

Análisis dinámico. Prototipo de sistema de medición de frecuencias fundamentales aplicado al Puente Isabel II de Sevilla.



Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Autor: Sergio Moreno Páez

Tutor: José Sánchez Sánchez

Trabajo Fin de Grado de Estructuras

Grupo TFG-B

Curso 2018/2019

Índice

1 – Resumen.....	3
2 – Objetivos.....	4
2.1 – Objetivo principal.....	4
2.2 – Objetivos secundarios.....	4
3 – Justificación.....	5
3.1 – Motivación.....	5
3.2 – Delimitación del ámbito de estudio.....	7
4 – Estado de la cuestión.....	8
4.1 – Análisis modal.....	8
4.2 – Técnicas de análisis modal.....	9
4.3 – Análisis modal operacional (OMA).....	11
5 – Metodología.....	13
6 – Desarrollo.....	14
6.1 – Modelado Puente Isabel II en CAD.....	14
6.1.1 – Introducción histórica.....	14
6.1.2 – Modelado en CAD.....	17
6.2 – Análisis Modal Puente Isabel II con SAP2000.....	20
6.2.1 – Importación del modelo CAD a SAP2000.....	20
6.2.2 – Materiales.....	20
6.2.3 – Secciones.....	20
6.2.4 – Apoyos.....	21
6.2.5 – Evolución del modelo.....	22
6.2.6 – Análisis modal.....	22
6.3 – Sistema de medición.....	24
6.3.1 – Introducción.....	24
6.3.2 – Sensor.....	24
6.3.3 – ADC.....	25
6.3.4 – Prototipo.....	26
6.4 – Toma de datos.....	28
6.5 – Análisis de datos.....	30
6.6 – Análisis y valoración de resultados.....	31
6.7 – Actualización del modelo.....	34
7 – Conclusiones.....	36
8 – Futuras investigaciones.....	37
9 – Anexos.....	38
9.1 – Planos puente Isabel II, Sevilla.....	38
9.2 – Programa de Arduino.....	42
10 – Bibliografía.....	48
11 – Índice de imágenes.....	51

1 – Resumen

El análisis dinámico se encarga del estudio del comportamiento dinámico de las estructuras ante las diferentes acciones que actúan sobre ella. Los distintos elementos que la componen forman un sistema de resonancia característico que revela información muy útil a la hora de evaluar su rendimiento, seguridad y posibles deterioros.

Este trabajo plantea una prueba de concepto de la técnica de análisis modal, como método para analizar las frecuencias fundamentales del puente de Isabel II de Sevilla. Para ello se desarrolla un prototipo básico de sistema de medición, se registran y analizan las vibraciones del puente y se comparan y validan los resultados obtenidos con los aportados por el cálculo por elementos finitos del modelo analítico.

Palabras clave

Puente Isabel II, Monitorización de la salud estructural (SHM), Vibración estructural, Análisis dinámico, Análisis modal, Análisis modal operacional (OMA), Periodo natural, Modos de vibración, Frecuencias fundamentales, Método de los elementos finitos (FEM), Prototipo, Arduino, Acelerómetro, Análisis espectral, Transformada rápida de Fourier (FFT), Transformada discreta de Fourier (DFT).

2 – Objetivos

2.1 – Objetivo principal

Desarrollo y validación de un prototipo de sistema de medición de bajo coste que permita analizar las frecuencias fundamentales de vibración de una estructura en su plano vertical, tomando como referencia los valores aportados por el cálculo por elementos finitos y bajo condiciones de servicio. Aplicado al análisis modal del tablero central del puente de Isabel II de Sevilla

2.2 – Objetivos secundarios

Definición de un modelo en CAD del tablero central del puente Isabel II

Definición de un modelo para el cálculo de la estructura del tablero central del Puente Isabel II por el método de los elementos finitos usando el software SAP2000.

Desarrollar un análisis modal del Puente de Isabel II mediante SAP2000 y mediante ensayos experimentales.

Obtención de un modelo final de cálculo analítico, corregido a partir de los datos extraídos mediante ensayos, con una respuesta dinámica similar a la del puente construido.

3 – Justificación

3.1 – Motivación

Las acciones dinámicas que actúan sobre las estructuras son variables en el tiempo. Ejemplos de acciones dinámicas son la acción del viento, el sismo, el paso de vehículos y personas y la vibración de maquinarias. Aun hoy, muchas de estas acciones se consideran estáticas en el proceso de diseño, cálculo y análisis estructural. Esto es, se aplican a los modelos como acciones mayoradas invariables en el tiempo. (*Miguel, 2011, pp 9-11*)

Cuando se calcula o analiza una estructura que considera sus acciones dinámicas como estáticas se obtienen unos resultados que si bien pueden cumplir los ELU y ELS en la hipótesis más desfavorable, pueden estar ocultando los efectos de resonancia que las acciones dinámicas provocan en la estructura. Un ejemplo ilustrativo de resonancia es el que se produce cuando la acción del viento actúa sobre una estructura con una frecuencia que coincide con las frecuencias de vibración de la estructura. En tal caso, aunque la fuerza del viento no sea relevante, su acción prolongada provoca un efecto de resonancia en estas frecuencias que puede dar lugar a un fallo estructural. Esto fue lo que ocurrió en el colapso del puente de Tacoma, EEUU en 1940. Otro caso más reciente que ilustra este fenómeno es el ocurrido en el puente del Milenio de Londres en el año 2000. Aquí fue la acción del público paseando por la pasarela la que entró en resonancia con el puente que tuvo que ser cerrado al público para someterse a una serie de reformas.



Imagen 1: Vibración del puente de Tacoma, 1940

Además de conocer los posibles efectos notables en las condiciones de servicio, confort y seguridad que puede provocar la resonancia estructural, hay otros aspectos que resultan de gran interés de la respuesta dinámica de una estructura. Dado que ésta depende de la masa y de la rigidez de la estructura, el estudio de su evolución en el tiempo aporta información que puede ser relevante a la hora de evaluar la pérdida de rigidez de alguno de sus elementos así como la aparición de grietas y discontinuidades.

El análisis dinámico estructural se encarga de estudiar estas acciones y comportamientos desde el punto de vista dinámico. Y los métodos que pone en práctica son de dos tipos: numéricos y experimentales. El método numérico se usa en las fases de diseño, cálculo y monitorización de estructuras ya construidas, usando programas informáticos para calcular modelos analíticos mediante el método de los elementos finitos (FEM). El experimental se usa para registrar el comportamiento real de una estructura ya construida usando sensores.

El tema de este trabajo surge del interés por conocer estas técnicas y tecnologías. Actualmente se dispone de múltiples herramientas informáticas de cálculo por FEM, y de análisis espectral de señales, sin embargo los equipos de medición aun resultan demasiado costosos. Por ello se plantea aquí el desarrollo de un prototipo básico de sistema de medición de vibraciones basado en el ecosistema de desarrollo libre de Arduino que pueda servir como punto de partida de desarrollo de equipos más avanzados.

Por último, el trabajo pretende poner en práctica estos conocimientos y herramientas en el estudio de un caso real, el puente Isabel II de Sevilla, que sirva para cubrir, dentro de sus limitaciones, el ciclo completo del análisis: desarrollo y selección de herramientas de análisis, cálculo por FEM del modelo, registro y análisis de datos mediante ensayos y ajuste del modelo a partir de los resultados obtenidos experimentalmente.

3.2 – Delimitación del ámbito de estudio

Este trabajo se plantea como una prueba de concepto, es decir, es un ejercicio de validación de un método de análisis estructural, y en este sentido no pretende profundizar de manera exhaustiva en ninguna de las técnicas y procesos involucradas. Su metodología está más bien centrada en el proceso, en la realización de un ciclo completo de análisis y en el desarrollo de las herramientas necesarias. Es por ello que tanto el método así como el modelo de análisis y las herramientas de estudio que se describen aquí se han seleccionado siguiendo un criterio de sencillez y abarcabilidad.

Hay diversos métodos de análisis dinámico. En este trabajo se utiliza el método operacional (OMA) en el que las vibraciones de la estructura se registran estando sometida ésta a las cargas de servicio exclusivamente. Esto permite poner en práctica este método usando sólo un acelerómetro.

El modelo de análisis es el tablero central del Puente Isabel II de Sevilla. Cualquiera que haya paseado por él habrá notado que sus vibraciones son notables, sobre todo en días de viento o cuando pasan vehículos. El registro de sus vibraciones no requiere por tanto de sensores de gran precisión, que resultarían costosos y de implementación compleja. Es un puente de estructura metálica del que se disponen planos detallados, por lo que resulta un estructura relativamente sencilla de modelar en CAD y de caracterizar en SAP2000 para su cálculo por FEM.

Siguiendo este mismo criterio el sistema de medición se desarrolla usando la plataforma Arduino y con componentes disponibles en el mercado listos para conectar, sin necesidad de instrumentación especial ni de electrónica avanzada. El dispositivo, tal y como se desarrolla en el actual trabajo, solo registra señales en el eje vertical y tiene poca precisión a bajas aceleraciones, por lo que su uso estaría limitado en todo caso al estudio de vibraciones en puentes, forjados y vigas.

El análisis de los datos de los ensayos OMA se puede realizar con diversas técnicas, entre ellas el *Peak Picking* que es la más simple y la que se pone en práctica en este trabajo. Esta técnica consiste simplemente en la realización de un análisis espectral aplicando la transformada discreta de Fourier (DFT).

En último lugar, se propone un ajuste del modelo de análisis a partir de los resultados de los ensayos en el que se hace una propuesta de actualización de las características de los apoyos del modelo modificando su rigidez estructural, sin entrar en las formulaciones algorítmicas propias de este tipo de técnicas de ajuste definidas como *FEM updating*.

4 – Estado de la cuestión

4.1 – Análisis modal

El análisis modal es una de las técnicas más usadas en la estimación de las propiedades dinámicas de una estructura: frecuencias naturales, modos de vibración y amortiguamiento.

Las estructuras tienen un modo natural de vibrar que se produce en una serie de frecuencias armónicas o resonantes, las frecuencias naturales. En cada una de estas frecuencias, la estructura vibra de una forma diferente, que serían los modos de vibración. La energía mecánica de una estructura que vibra se disipa en forma de otros tipos de energía, como el calor, que se conoce como el amortiguamiento del sistema estructural (*Frechilla, 2017, p 22*).



Imagen 2: Modos de vibración

Las frecuencias naturales de vibración de una estructura son de especial interés por varios motivos. En primer lugar definen las frecuencias armónicas en las que la estructura puede entrar en resonancia, recordemos lo sucedido en el puente del Millenium Bridge de Londres, y en la fase de diseño deben de estar alejadas en la medida de lo posible de las posibles frecuencias de las acciones que actúen sobre ella. En el citado puente, la frecuencia de paso de los peatones paseando por el puente, entró en resonancia con una de sus frecuencias fundamentales.

En segundo lugar, los valores de las frecuencias naturales son una función de la masa y la rigidez de la estructura. A mayor rigidez estructural, mayores frecuencias de vibración tiene la estructura (*Miguel, 2011, p 11*). Esto supone que, por ejemplo, se puede medir la pérdida de rigidez de un elemento estructural a partir del estudio de sus frecuencias naturales. Si éstas frecuencias medidas mediante ensayos son menores que las que deberían de tener según su diseño, una de las posibles causas sería que se hubiese producido una pérdida de rigidez en el elemento.

Por último, la primera frecuencia, que vibra según el periodo fundamental o natural, es de especial relevancia a la hora de evaluar su comportamiento ante el sismo, ya que es la frecuencia de vibración que involucra mayor masa y mayores desplazamientos (*Dominguez, 2014, p 1*)

4.2 – Técnicas de análisis modal

Hay varias técnicas de análisis modal. La técnica más sencilla es el análisis modal teórico mediante el que se resuelven unas ecuaciones de movimiento a partir de las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento (Rodríguez, 2005, p 51).

Si bien este tipo de análisis se puede poner en práctica para algunos casos sencillos usando expresiones analíticas, por lo general se realiza mediante modelos discretos usando programas de cálculo con el método de los elementos finitos. El modelado y cálculo por FEM suele usarse en la fase de diseño o en la fase de caracterización modal de una estructura ya construida.

El otro tipo de análisis modal son los ensayos modales y está basado en ensayos realizados sobre la obra ya construida. Mediante estos ensayos, se registra la respuesta de la estructura ante las acciones dinámicas usando sensores. Cuando podemos controlar la acción de entrada, usando, por ejemplo, excitadores hidráulicos, realizamos un análisis modal experimental (EMA) (Vázquez, 2015, p 23). Cuando la acción dinámica que actúa sobre la estructura son sus cargas de servicio, se trata de un análisis modal operacional (OMA).

En estos ensayos, la señal registrada por los sensores, acelerómetros, se filtra de ruidos y/o amplifica y luego se digitaliza mediante un conversor analógico digital (ADC). Una vez digitalizada, se analiza la señal para obtener sus parámetros modales.

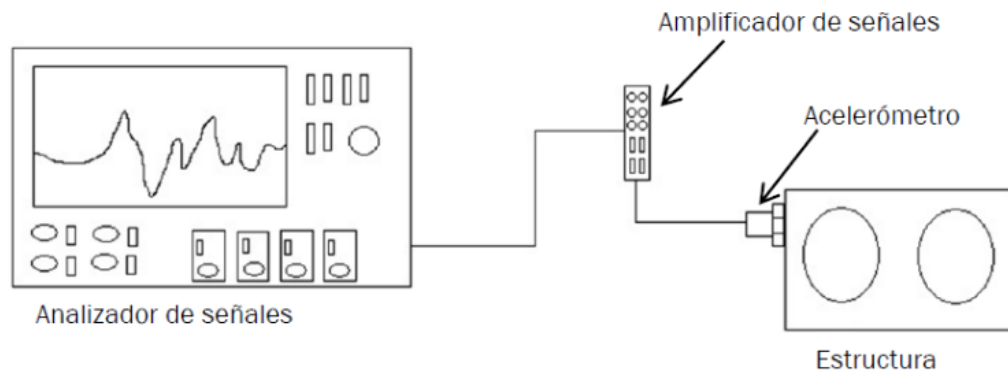


Imagen 3: Esquema análisis modal operacional

Por último, cuando se trata de analizar las características de una obra construida, ésta puede ser sometida simultáneamente a un análisis modal por FEM y por ensayos surgiendo la oportunidad de aplicar otra técnica de gran interés, el *FEM updating*:

“A partir de los datos experimentales identificados, se puede acometer el proceso de calibración del modelo numérico, mediante el uso de diferentes algoritmos matemáticos. Dicha calibración del modelo se refiere a la corrección de las deficiencias inherentes en el modelo de EF, haciendo finalmente coincidir los resultados de éste con los datos medidos. La gran potencialidad que ofrece dicho proceso es la generación de modelos informáticos más fiables, cuyo comportamiento dinámico se ajusta al real” (Pachón, 2016, p 13)

El *FEM updating* permite por tanto corregir la caracterización del modelo numérico, que en su definición teórica ideal no suele responder de la misma manera que el real. Es decir, en una obra construida, la geometría, el comportamiento de los materiales y la rigidez de los encuentros y apoyos son difíciles de representar con exactitud mediante un modelo analítico y estas técnicas permiten acercar la respuesta de dicho modelo con el comportamiento real.

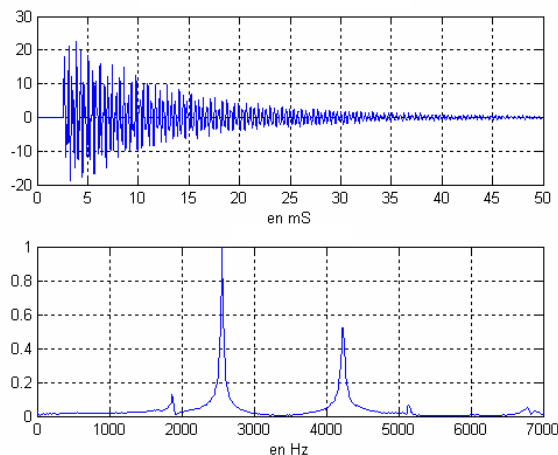
4.3 – Análisis modal operacional (OMA)

El método de análisis modal operacional, usado en este trabajo, es el que se usa con mayor frecuencia en obras de edificación, mientras que el análisis modal experimental es de aplicación más frecuente en el campo de la ingeniería debido principalmente a que las acciones que actúan sobre las edificaciones son desconocidas: un conjunto de acciones de servicio que constituyen un ruido indeterminado, que se conoce como señal estocástica o ruido blanco. En el análisis de los datos obtenidos mediante el método operacional no es posible, por tanto, comparar las frecuencias de las acciones de entrada con la respuesta de la estructura por lo que los resultados obtenidos por este método suelen ser de menor precisión que los obtenidos mediante EMA y suele precisar de acelerómetros de mayor precisión.

Sin embargo, el método OMA presenta una serie de ventajas con respecto al método EMA (Rodríguez, 2005, p 63):

- No necesita de excitadores artificiales, solo es necesario colocar los acelerómetros de medida. Este método resulta por tanto más económico y requiere menor tiempo
- Permite el uso de la estructura durante el ensayo, ya que los equipos de medida no interrumpen el servicio de la misma.
- Permite conocer la respuesta de la estructura bajo condiciones reales de uso
- Evita dañar la estructura con la aplicación de cargas artificiales

Las señales registradas mediante ensayos, se pueden analizar en el dominio del tiempo, es decir, como variables a lo largo del tiempo, o en el dominio de la frecuencia, como variables de las frecuencias en las que se descompone.



Imágen 4: Señal en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

El método OMA usa diversas técnicas de análisis en el dominio de la frecuencia de las señales registradas por los acelerómetros. Entre ellas están el *Peak Picking*, el *Frequency Domain Decomposition* y el *Averaged Normalized Power Spectral Densities*. (Vázquez, 2015, p 27). Aquí se describe brevemente la técnica *Peak Picking*, que es la que se pone en práctica en el presente trabajo. Según Rodríguez Súnico, el método *Peak Picking* es:

“..el método más simple conocido para identificar los parámetros modales de estructuras de ingeniería civil sujetas a cargas ambientales. Se basa en que la función de respuesta en frecuencia alcanza valores extremos en torno a las frecuencias naturales. [...] Las frecuencias naturales se determinan como los picos de la función densidad espectral promediada y normalizada. Esta función se obtiene básicamente convirtiendo las medidas de aceleraciones al dominio de la frecuencia mediante la transformada de Fourier discreta (DFT)” (Rodríguez, 2005, p 64)

El método OMA, aplicando la teoría *Peak Picking*, consiste, por tanto, en registrar las vibraciones de la estructura usando un acelerómetro, obteniendo la señal en el dominio del tiempo. Posteriormente esa señal se convierte al dominio de la frecuencia usando la transformada discreta de Fourier que da como salida el espectro de frecuencias de las aceleraciones, desde el que se extraen las frecuencias fundamentales que serían los picos del espectro.

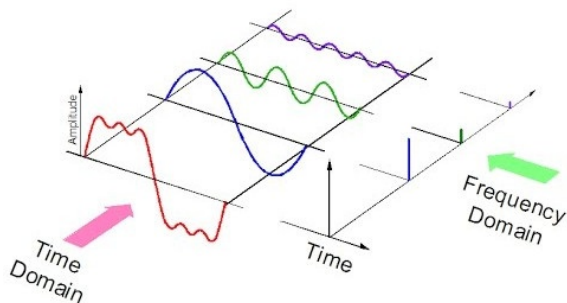


Imagen 6: Señal compuesta por varios armónicos

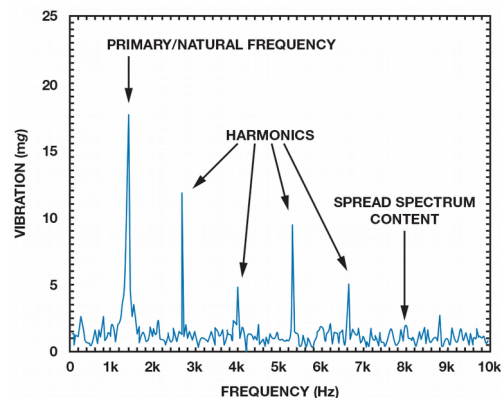


Imagen 5: Espectro de frecuencias

5 – Metodología

En el desarrollo de un sistema de medición experimental es necesario definir un marco metodológico que permita comparar los resultados obtenidos mediante ensayos con unos datos de referencia. En el desarrollo de este tipo de sistemas se suele usar un método comparativo en laboratorio con respecto a los resultados obtenidos por sistemas certificados. Este método, aparte de costoso, está enfocado más hacia la certificación de equipos y se suele usar en la última fase de desarrollo de un sistema comercial. En este trabajo, sin embargo, se opta por una metodología que quede inscrita en el ámbito de las técnicas para las que se desarrolla el sistema, el análisis modal, permitiendo de esta forma aplicar éstas técnicas como método para validar el sistema.

El planteamiento general del método consiste por tanto en desarrollar un sistema de medición que se usará para realizar un registro de vibraciones en el puente, y cuyos resultados se compararán y validarán con los resultados modales obtenidos del cálculo por FEM del modelo analítico del puente. En detalle, la metodología se organiza en las siguientes fases:

Modelado en CAD del tablero central del puente Isabel II

El modelo en CAD del puente que se levanta usando objetos 3DCARA y se organiza en capas en función de las distintas secciones metálicas y de hormigón del puente.

Modelado y análisis modal en SAP2000 del puente por FEM

El modelo de SAP2000 se realiza a partir del modelo en CAD. En SAP2000, se importa cada capa del modelo CAD y se le asignan las distintas secciones de material, acero u hormigón y se definen los apoyos. Una vez completado el modelo se realiza el análisis modal de la estructura, de donde se obtienen los distintos modos de vibración, y sus correspondientes frecuencias y periodos.

Desarrollo del prototipo del sistema

El sistema de medición se desarrolla con Arduino. Se seleccionan los dispositivos necesarios entre los disponibles en el mercado que cumplan unos requisitos mínimos y que estén ya preparados para conectar directamente con la placa Arduino sin necesidad de electrónica adicional. A nivel de software se implementa un timer para la toma de datos del acelerómetro a 512Hz y una librería para el cálculo de la frecuencia de vibración más destacada en cada segundo mediante la transformada rápida de Fourier (FFT)

Registro y análisis de datos

En la siguiente fase se realiza una campaña de toma de datos con el equipo, se analizan los datos y se obtienen las frecuencias fundamentales del puente.

Comparativa y valoración de resultados

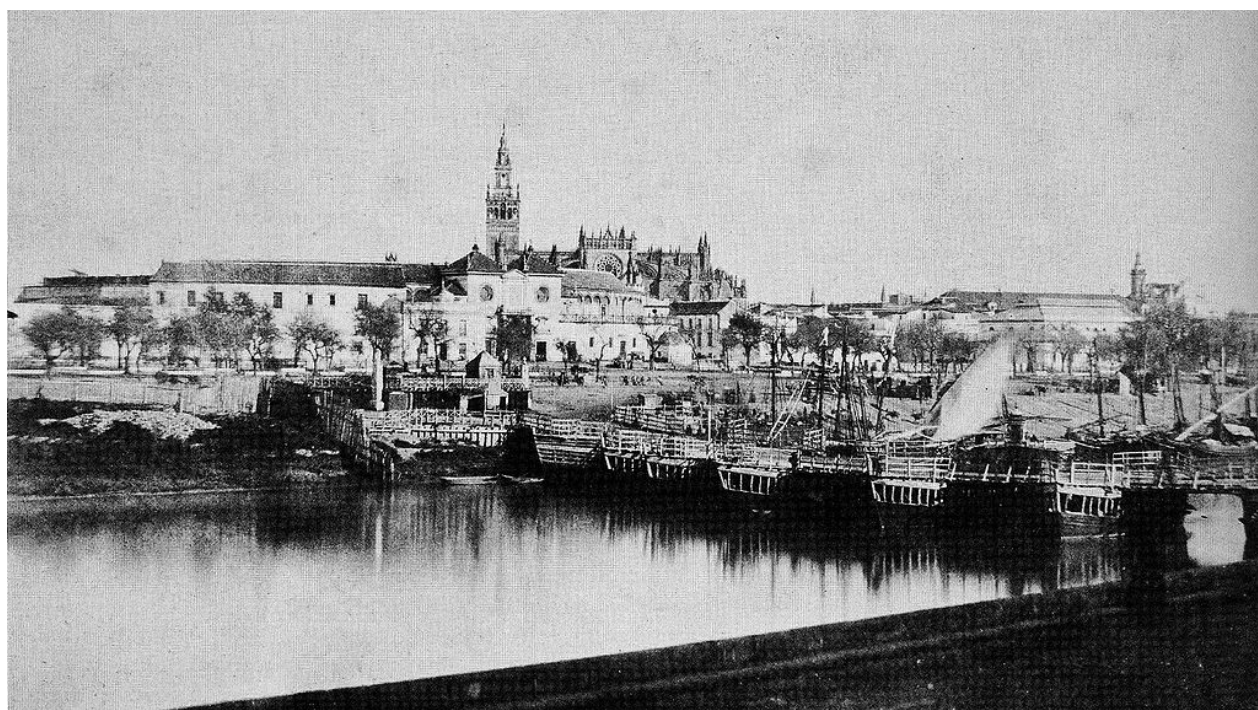
Los resultados de los ensayos se comparan con los obtenidos mediante SAP2000. Se valoran las discordancias y en consecuencia, se realiza un ajuste del modelo numérico.

6 – Desarrollo

6.1 – Modelado Puente Isabel II en CAD

6.1.1 – Introducción histórica

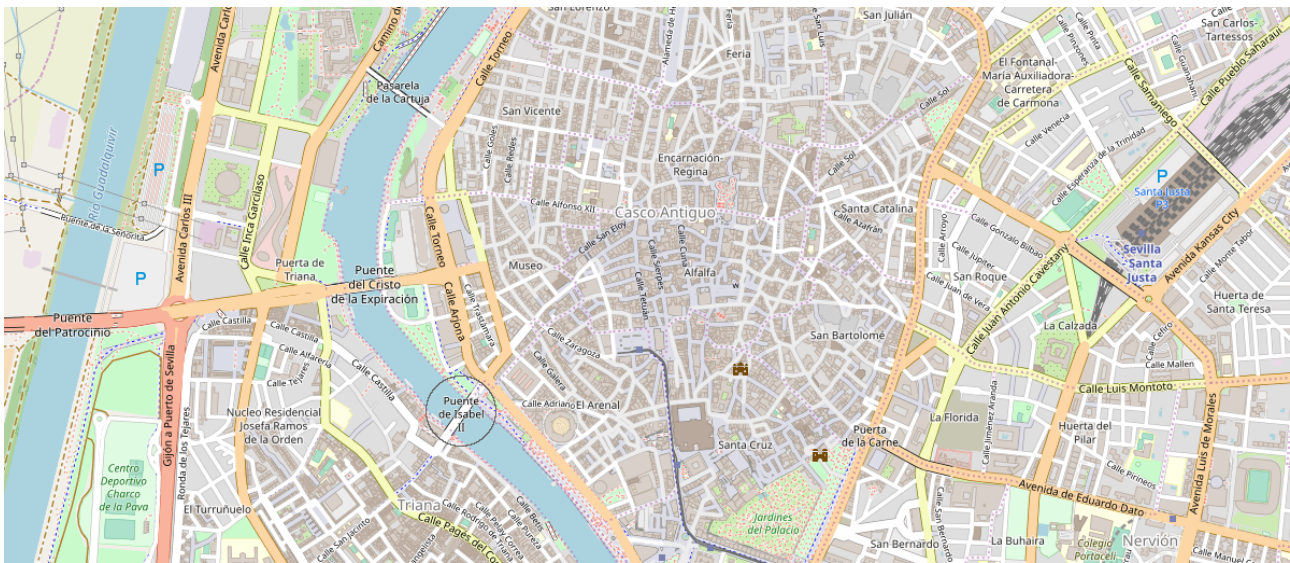
Desde el siglo XII hasta mediados del siglo XIX el puente que unía ambas orillas del Guadalquivir a su paso por Sevilla se construía como puente de barcas. Su construcción se basaba en la unión de varias barcas fuertemente atadas y ancladas sobre las que se montaba un tablero construido en madera.



Imágen 7: Punte de Barcas. 1851

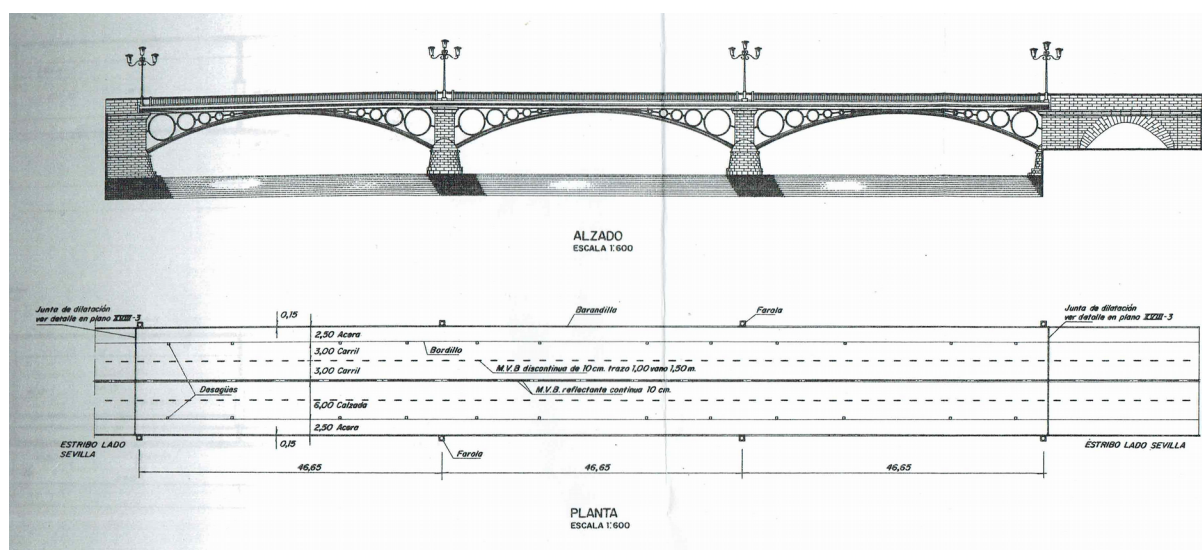
Las continuas riadas que azotaban la ciudad hasta que se desvió su cauce, ya a mediados del siglo XX, provocaban grandes desperfectos en el puente, y en algunos casos, la ruptura del mismo.

A partir del siglo XVI se elaboraron varios proyectos de puente fijo, pero no es hasta 1844, cuando los ingenieros franceses Fernando Bernadet y Gustavo Steinacher presentan el proyecto de un puente de hierro colado apoyado en pilastras centrales, que el ayuntamiento aprueba su construcción, siendo inaugurado en el año 1852 con el nombre que ahora conocemos, puente de Isabel II.

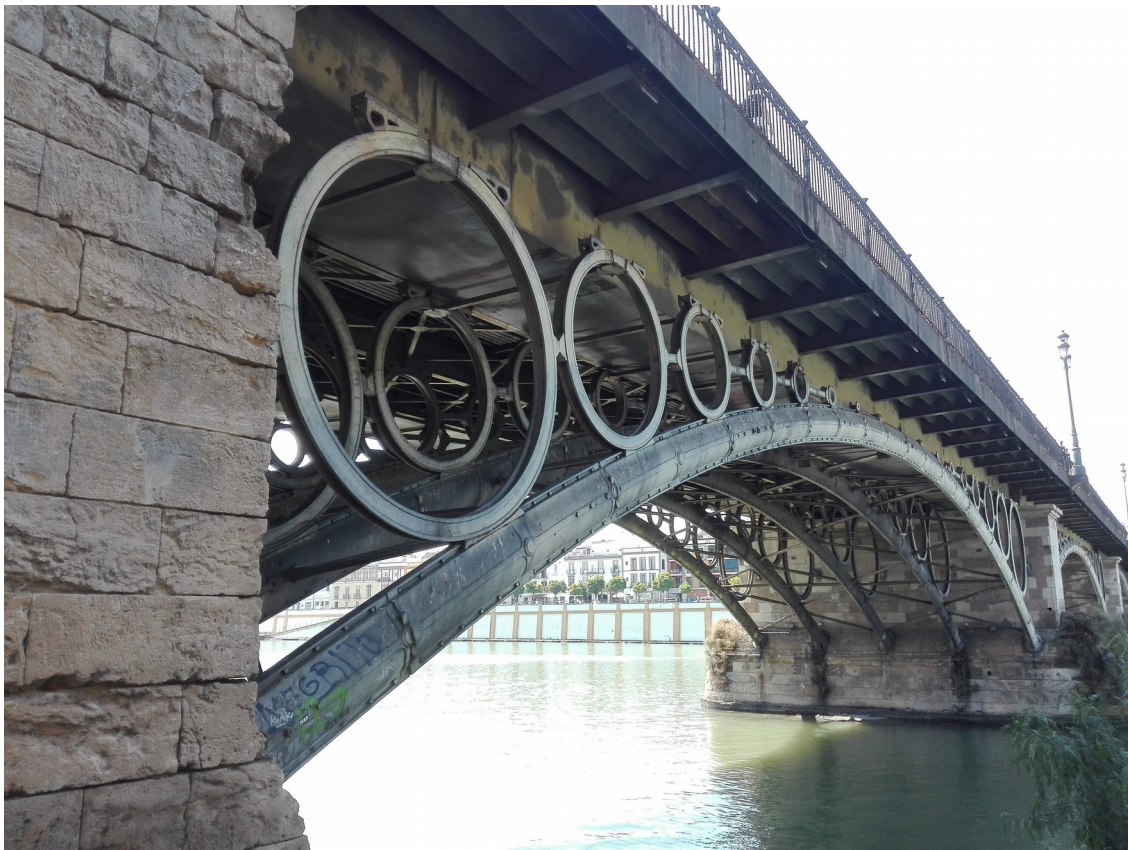


Imágen 8: Situación puente Isabel II, Sevilla

Este es el puente que ha llegado hasta nuestros días aunque a lo largo de los años ha sufrido distintas reparaciones y modificaciones. Originalmente, este puente tenía un tablero de estructura metálica que se apoyaba sobre una estructura de anillos que distribuía el peso hacia las pilastras. En 1917 se tuvo que sustituir el tablero, que seguía apoyando sobre la estructura de anillos. El tablero fue desgastándose paulatinamente en los siguientes años debido principalmente al aumento del tráfico de vehículos y fue finalmente en 1974 cuando se aprobó el proyecto de Juan Batanero que presenta la configuración estructural que llega hasta nuestros días. Este proyecto sustituye el tablero y proyecta uno nuevo que apoya sobre las pilastras de piedra, conservando la estructura original de apoyo de anillos pero ya sin capacidad portante. (Cortés, 2018, p 10).



Imágen 9: Alzado y planta proyecto de Juan Batanero, 1974



Imágen 10: Puente Isabel II. 2019



Imágen 11: Viario, carril bici y acerado del puente Isabel II. 2019

6.1.2 – Modelado en CAD

El modelo en CAD del puente se ha realizado a partir de los planos originales del proyecto de Juan Batanero. Estos planos se han extraído del libro de Ramón Argüelles Álvarez. 1982. *La estructura metálica hoy, tomo II, proyectos y plano*. ISBN-9788460056737.

El estudio de este trabajo se centra en el tablero central del puente, que poya en las dos pilastras centrales. Estructuralmente, se trata de un tablero metálico ortótropo apoyado sobre dos vigas cajón metálicas. Las vigas cajón apoyan sobre las pilastras mediante apoyos de neopreno. Esta estructura, vigas cajón y tablero ortótropo, son las que se han considerado a la hora de realizar el modelo. Los anillos metálicos que antiguamente servían para distribuir las cargas del tablero a las pilastras actualmente no tienen función estructural así que no se ha considerado necesaria su modelización para la realización del presente estudio.

El tablero central tiene una longitud entre los apoyos de 46.5 metros y una anchura de 25 metros. El tablero se divide longitudinalmente en 16 tramos de 2.9 metros.

Las vigas cajón

La viga cajón tiene una sección de 2 metros de alto por 2.5 de ancho. El espesor lateral de la viga es de 12mm en sus 12 tramos centrales y de 15mm en los dos últimos tramos de cada extremo, con una base de 30mm de espesor. En la separación de cada tramo las vigas cajón se rigidizan con unos mamparos de 8mm de espesor. Las vigas cajón están reforzadas longitudinalmente por un par de perfiles normalizados HEB. Los tramos finales, presentan una serie de refuerzos adicionales.

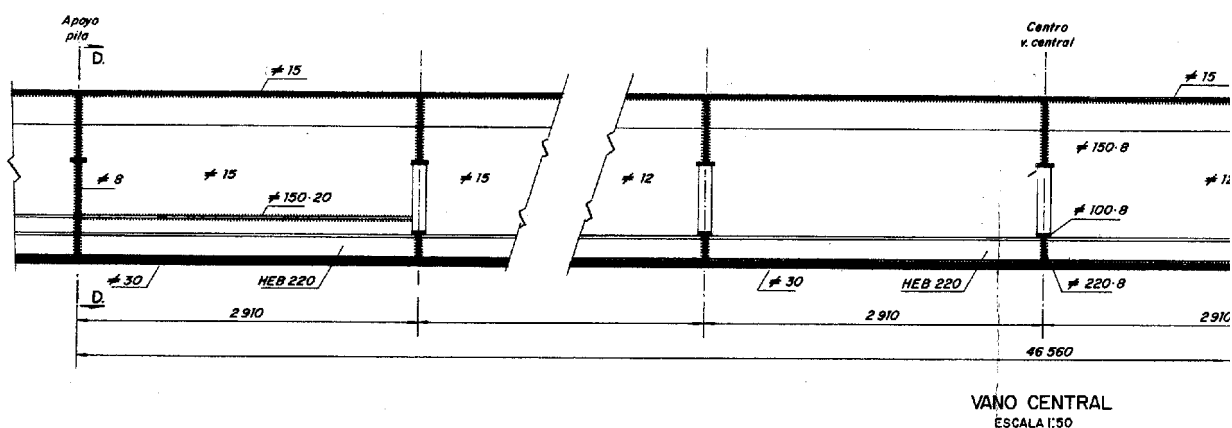
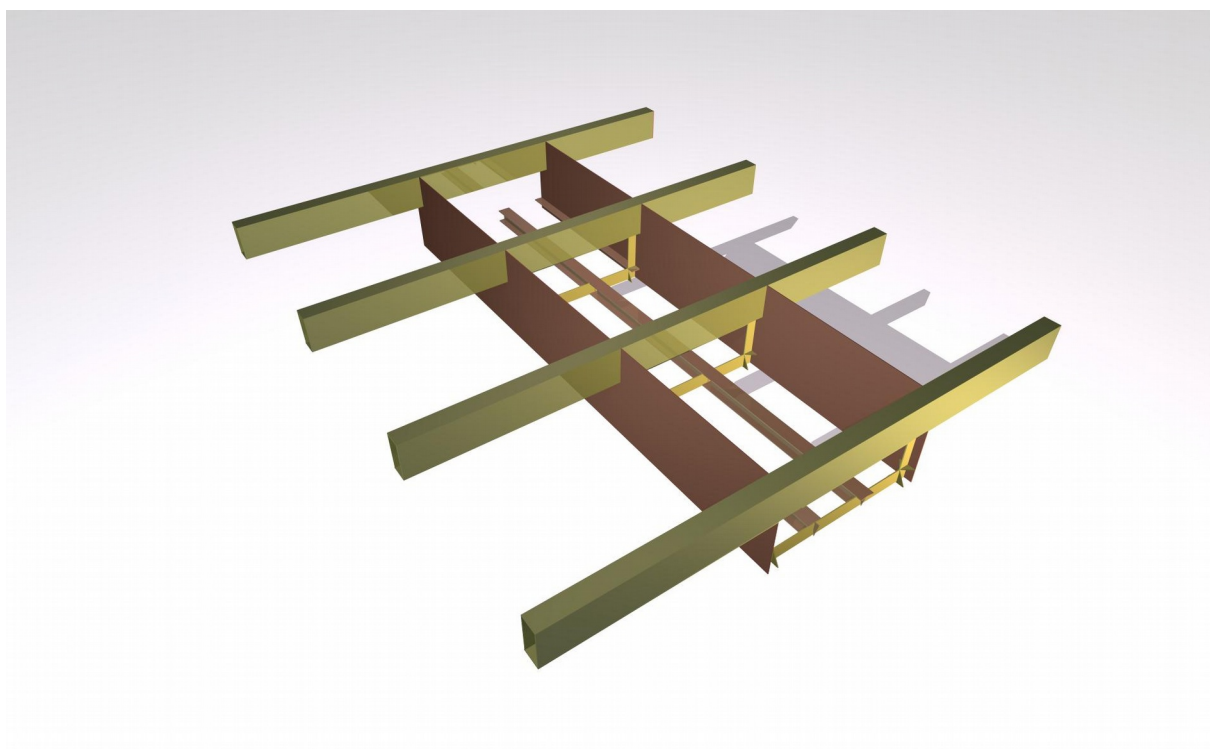


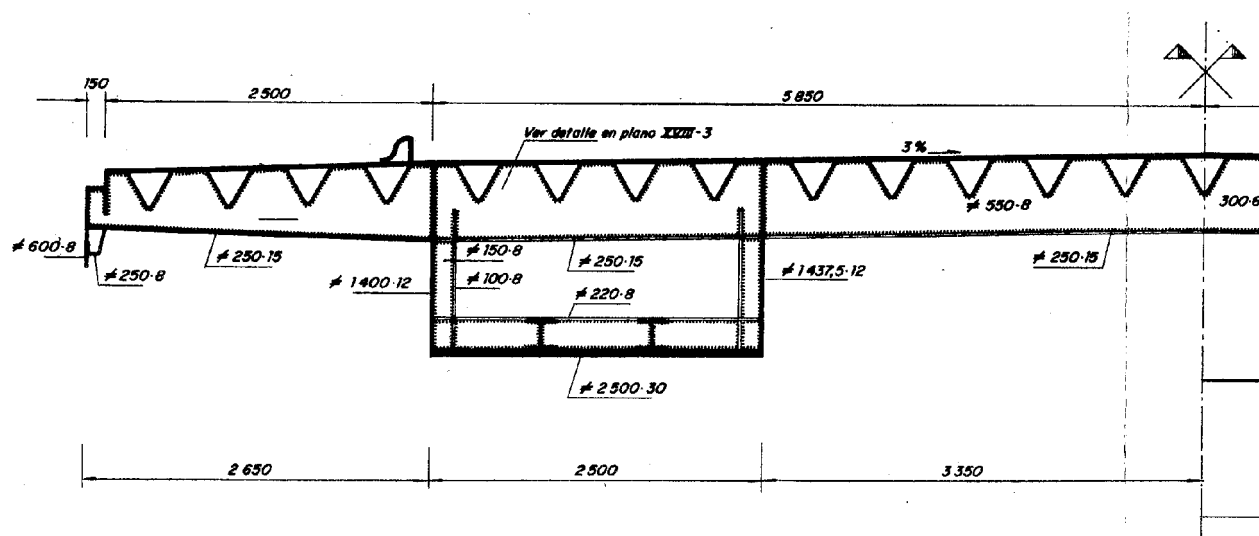
Imagen 12: Detalle viga cajón, vano central puente



Imágen 13: Render de detalle viga cajón, mamparos, HEB refuerzos y vigas transversales ortótropo.

El tablero ortótropo

Transversalmente, el tablero ortótropo está formado por unas vigas metálicas de sección rectangular colocadas en los extremos de cada tramo, coincidiendo con los mamparos. Cada viga tiene una sección de 250mm de ancho por 550mm de alto con un espesor lateral de 8mm y superior e inferior de 15mm. Longitudinalmente lleva una chapa plegada de 6mm de espesor.



Imágen 14: Detalle encuentro viga cajón con tablero ortótropo

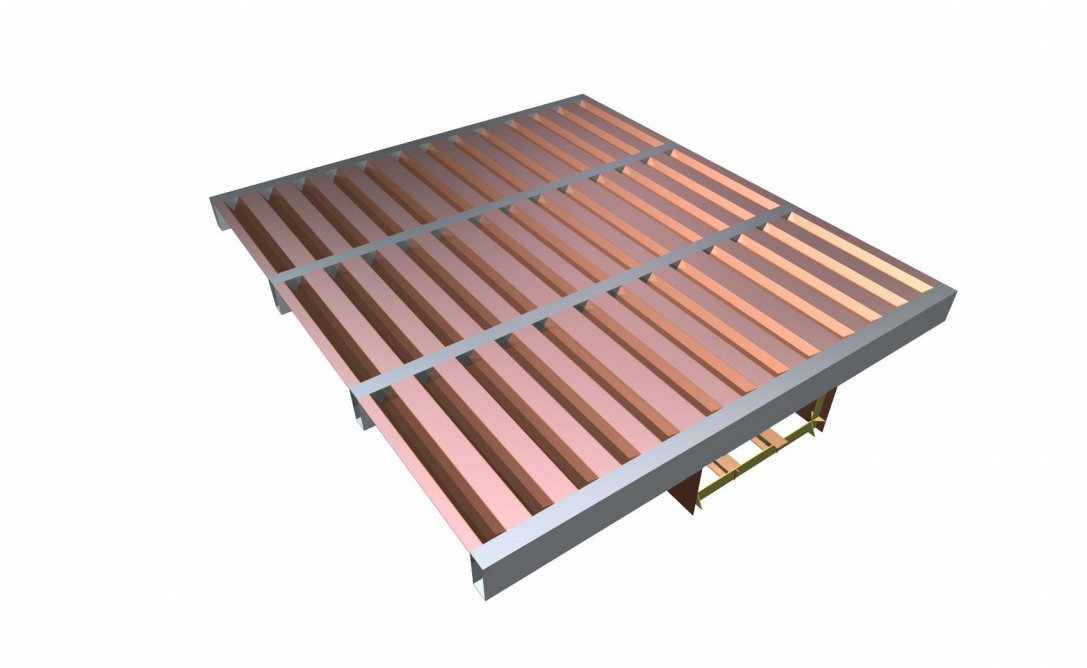


Imagen 15: Render de detalle tablero ortótropo.

El modelo se completa con unas piezas horizontales que cubren los huecos de la chapa doblada longitudinal del tablero.

Para la modelización se ha usado el programa Autocad. Los elementos del modelo están representados con elementos 3DCARA dispuestos a eje, para luego poder aplicar los grosores de los mismos en el programa SAP2000 definiendo las secciones correspondientes. La subdivisión de los elementos de la estructura en elementos 3DCARA se ha realizado siguiendo un criterio de uniformidad de tamaño.

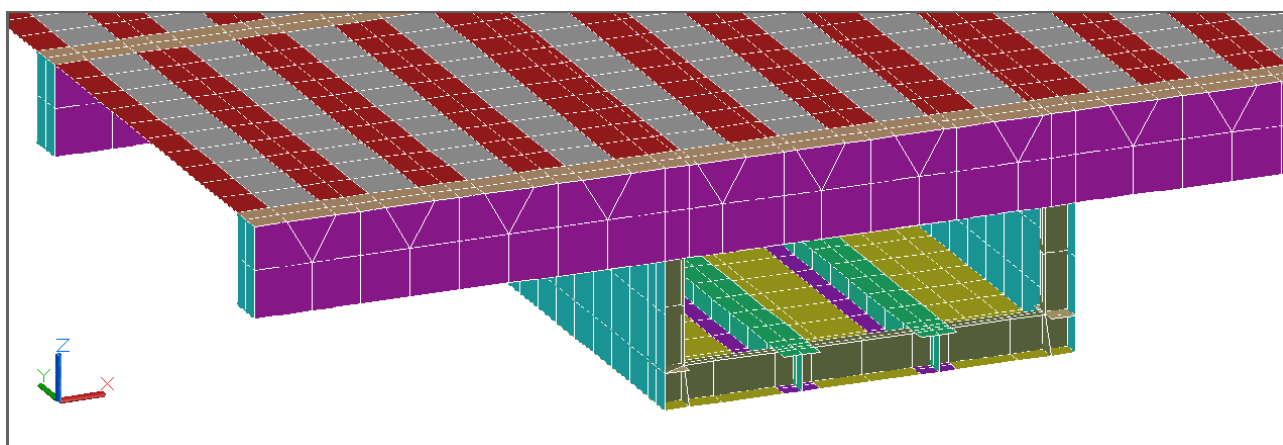


Imagen 16: Detalle despiece 3DCARA: ortótropo, viga cajón, perfiles HEB y mamparos

6.2 - Análisis Modal Puente Isabel II con SAP2000

6.2.1 – Importación del modelo CAD a SAP2000

Para el análisis modal numérico del tablero del puente se ha usado el programa SAP2000, que realiza el cálculo usando el método de los elementos finitos (FEM).

Cada elemento estructural del modelo CAD está modelado como una suma de objetos 3DCARA, formando una malla de elementos unidos por los nodos. Cada objeto 3DCARA al importarse al SAP2000 se convierte en un objeto de área al que luego se le aplica la sección correspondiente.

El modelado en CAD se ha organizado en capas, según los distintos tipos de secciones de chapa y hormigón (6mm, 8mm, 12mm, etc). Al importar el modelo CAD al SAP2000 se han definido grupos, siguiendo este mismo criterio y se ha importado cada capa de CAD a un grupo con el mismo nombre con el fin de que durante la caracterización de la estructura sea sencillo seleccionar los grupos por separado para asignarles su tipo de sección correspondiente.

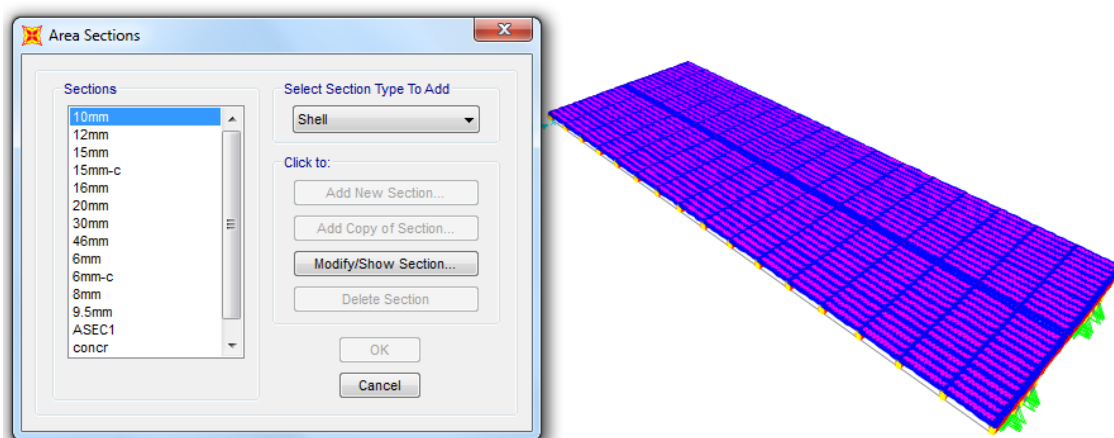
6.2.2 – Materiales

En SAP2000 se han definido dos tipos de materiales. Por un lado el acero tipo S275 (el más parecido al A-42c del proyecto) que se asignará a todas las secciones metálicas, que se selecciona desde el catálogo de materiales de norma europea del SAP2000. Por otro lado el hormigón, que se usa para las secciones de los viales y el acerado, tipo C35/45 de la misma norma.

6.2.3 – Secciones

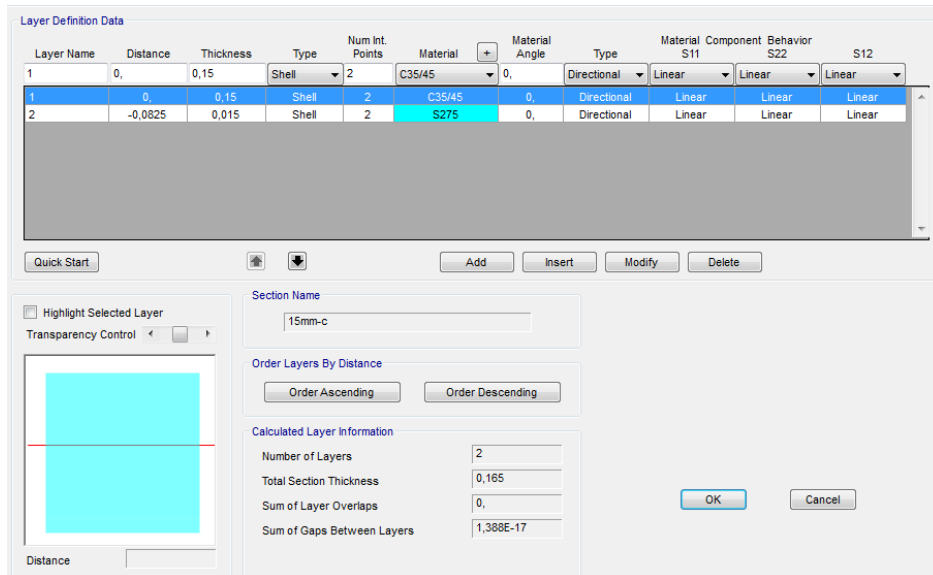
Para cada espesor de chapa metálica de la estructura del puente, se ha definido una sección tipo *Shell Thin* con el espesor correspondiente y el material S275 definido anteriormente. Cada una de estas secciones se ha asignado a cada grupo de objetos de la estructura metálica, según su espesor.

Los elementos, en rosa en la siguiente imagen, que cierran el espacio entre las vigas longitudinales del tablero y la chapa plegada, en azul, llevan una sección de 150mm de espesor de material C35/45.



Imágen 17: Secciones de área en SAP2000

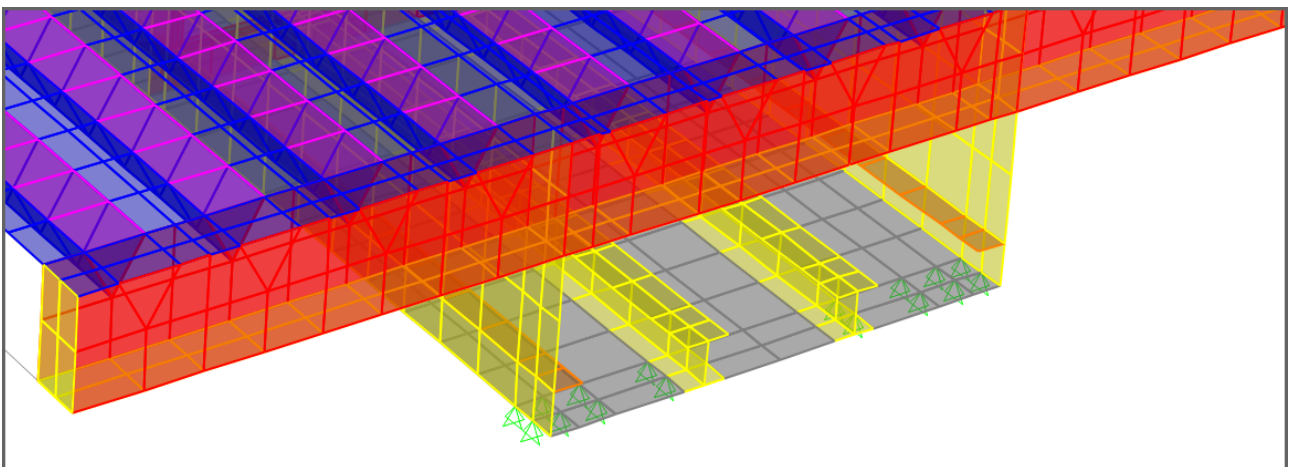
Hay una serie de elementos del modelo, las caras superiores de las vigas transversales del ortótropo y las caras superiores de la chapa doblada longitudinal, en azul en la imagen anterior, que se definen mediante secciones multicapa, ya que llevan acero en su cara inferior y hormigón en su superior, 15mm de acero y 150mm de hormigón en las vigas y 6mm de acero y 150mm de hormigón en la chapa doblada.



Imágen 18: Definición sección multicapa de la cara superior de las vigas ortótropo

6.2.4 – Apoyos

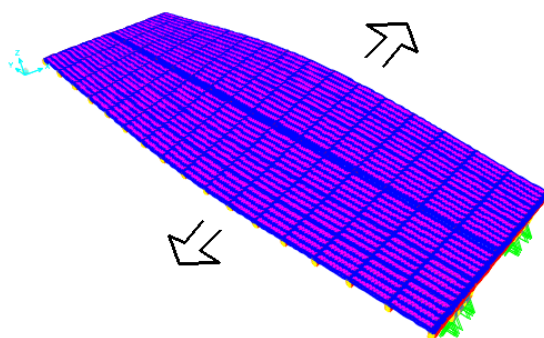
Los apoyos de las vigas cajón en las pilastras se han definido inicialmente como apoyos articulados, con restricciones de desplazamientos en los 3 ejes. De esta manera, la estructura queda inicialmente definida como hiperestática. Estos apoyos se han definido en la banda de nudos exterior de cada viga cajón, cubriendo una superficie similar a la de los apoyos reales de neopreno.



Imágen 19: Detalle apoyos y despiece shells, ocultando mamparos

6.2.5 – Evolución del modelo

El modelo que se presenta en el actual trabajo ha sufrido una evolución a lo largo de su desarrollo. La descripción pormenorizada de los cambios producidos en las diversas fases no son de especial relevancia, si bien hay una fase anterior al modelo descrito aquí que merece un comentario. Se trata de uno de los primeros modelos que se elaboró del puente, que no incluía los mamparos de rigidización de las vigas cajón. El análisis modal de este modelo con SAP2000, dio como resultado unos modos de vibración que no se correspondían con el comportamiento esperado. Al reproducir en SAP2000 los distintos modos de vibración se aprecia cómo la ausencia de los mamparos restan rigidez a las vigas cajón, produciendo un aplastamiento de las mismas en esta dirección y por tanto una vibración en horizontal de toda la estructura para los modos de vibración que la hacen vibrar transversalmente. En este punto, es cuando se añaden al modelo de CAD y SAP2000 los mamparos de rigidización completando el modelo de análisis descrito aquí.



Imágen 20: Efecto vibración en ausencia de mamparos

6.2.6 – Análisis modal

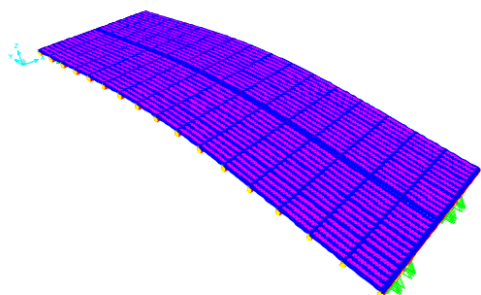
Una vez completada la caracterización del modelo, se procede a realizar el cálculo con SAP2000. El resultado del análisis modal del puente se muestra a continuación. En la primera tabla podemos ver las frecuencias fundamentales de los primeros modos de vibración en ciclos/segundo. Las 4 primeras frecuencias son de 2,6Hz, 3,6Hz, 6,2Hz y 8Hz respectivamente.

OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	Frequency Cyc/sec
MODAL	Mode	1	0,380367	2,62904250...
MODAL	Mode	2	0,272743	3,66645134...
MODAL	Mode	3	0,159539	6,26807591...
MODAL	Mode	4	0,124464	8,03447811...
MODAL	Mode	5	0,110334	9,06341930...
MODAL	Mode	6	0,092534	10,8068119...
MODAL	Mode	7	0,085943	11,6356791...
MODAL	Mode	8	0,078711	12,7047352...

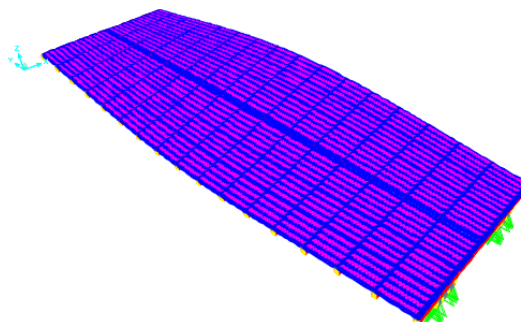
Imágen 21: Resultado análisis modal: frecuencias fundamentales

Los modos de vibración de las 4 primeras frecuencias serían los siguientes.

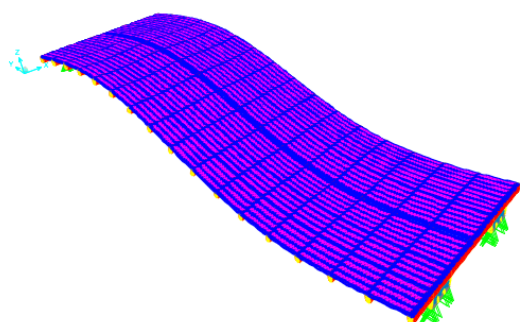
Modo 1 / 2,6 Hz



Modo 2 / 3,6 Hz



Modo 3 / 6,2 Hz



Modo 4 / 8 Hz

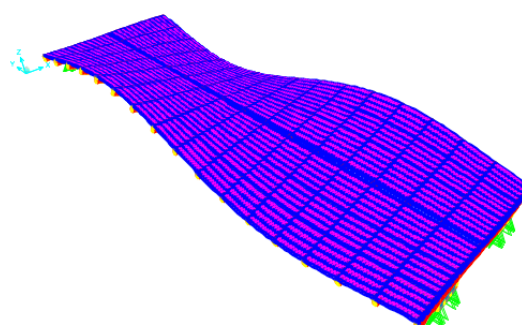


Imagen 22: Análisis modal: modos de vibración

Con estos resultados se completa la primera fase del análisis modal numérico. Una vez realizados los ensayos experimentales con el sistema de medición de vibraciones y extraídas las frecuencias fundamentales que resulten del mismo se realizará una comparativa y una valoración de las posibles discordancias.

6.3 – Sistema de medición

6.3.1 – Introducción

En el diseño de un sistema de medición de vibraciones hay que considerar, al menos, los siguientes componentes: sensor de vibraciones, conversor digital de la señal analógica de salida del sensor (ADC) y un sistema de almacenamiento de la señal digitalizada. Para su posterior análisis es necesario un software de análisis espectral que transforme la señal digitalizada en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia mediante la transformada discreta de Fourier (DFT) o la transformada rápida de Fourier (FFT). Hay diversas formas de diseñar un equipo de estas características. Este trabajo se centra en el desarrollo de un prototipo que puede funcionar de manera autónoma, alimentado por una batería externa de 5V. Se desarrolla en la plataforma Arduino, ya que ésta permite conectar y programar fácilmente todos los elementos necesarios.

6.3.2 – Sensor

El registro de las vibraciones se puede hacer con dos tipos de sensores: acelerómetros y geophones. Mientras que el acelerómetro registra aceleraciones, el geophone registra velocidades. Ambos sensores podrían ser válidos para el desarrollo del prototipo, sin embargo, el geophone presenta varios inconvenientes: por un lado, el valor de salida a bajas frecuencias tiene que ser corregido ya que la relación entre velocidad y voltaje a estas frecuencias sigue una función lineal; por otro lado, los geophones más básicos que se pueden encontrar en el mercado para el desarrollo de un prototipo de estas características son sensiblemente más costosos que los acelerómetros básicos. (*Vasheghani, 2013, p 12*)

En cuanto a los acelerómetros, hay dos grandes tipos, piezoeléctricos y MEMS. Los piezoeléctricos presentan algunas ventajas: por un lado, el bajo ruido, esto es, pueden medir aceleraciones en el rango de las decenas de μg (micro g) y por otro, su ancho de banda, que es bastante superior que la de los MEMS, esto es, su señal se puede samplear a altas frecuencias. La principal ventaja de los acelerómetros MEMS es su precio, ya que son mucho más económicos que los piezoeléctricos.

Para este prototipo se elige un acelerómetro tipo MEMS de bajo coste, un ADXL337 comercializado por Sparkfun. Este acelerómetro tiene un rango de medida de $\pm 3\text{g}$, un nivel de ruido relativamente bajo, apropiado para medir aceleraciones desde los $300\mu\text{g}$ y su ancho de banda es apropiado para el sistema, en torno a 500Hz. Esto significa que se puede samplear su señal a 500Hz, 500 por segundo.

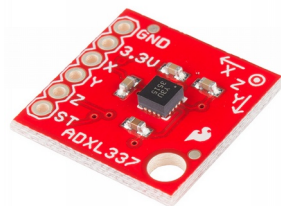


Imagen 23: ADXL337

En la elección del acelerómetro se han barajado varias opciones entre las disponibles en el mercado. Los otros acelerómetros estudiados tienen mejores características que el usado en el prototipo, pero presentan diversos inconvenientes: o bien no se pueden adquirir ya montados en placas listas para prototipar, placas de evaluación, que no necesiten de electrónica avanzada; o son de mayor coste que el ADXL337. La lista de los sensores estudiados es la siguiente (enlaces a especificaciones en bibliografía):

1. Silicon Designs 1521. (Jo, Hongki & Bridge, Jennifer & Spencer, Billie & Nagayama, Tomonori, 2010, p 5)
2. Analog Devices ADXL354/ADXL355. Un sensor de bajo ruido diseñado especialmente para monitorización estructural.
3. STMicroelectronics LIS344ALH.
4. Epson M-A351. (Zhu, Li & Fu, Yuguang & Chow, Raymond & Spencer, Billie & Woong Park, Jong & Mechitov, Kirill, 2018, p2)
5. Murata SCA-3300

6.3.3 – ADC

El conversor analógico-digital (ADC) recibe la señal analógica, del acelerómetro como voltajes que convierte en señales digitales para que luego puedan ser almacenadas y analizadas. Algunos de los sensores estudiados como el Murata SCA3300, tienen salida digital, por lo que no necesitan de ADC.

Las características principales de un ADC son el rango de voltaje de entrada y la resolución de salida. El ADC seleccionado para el prototipo es el ADS1115 de Texas Instruments, que tiene un rango de entrada sin amplificar entre 0 y 4.096 Voltios y una resolución de 15 bits (en el modo *Single Ended*). Esto quiere decir, que la señal de voltaje de entrada está limitada a 0-4.096V y que en ese rango su resolución es de 2^{15} , esto es, que la señal entre 0 y 4.096V puede dividirse en 2^{15} partes (32768 partes). Arduino dispone de un ADC de 12 bits, pero con esta resolución, no se llega a alcanzar la resolución propia del sensor ADXL337.

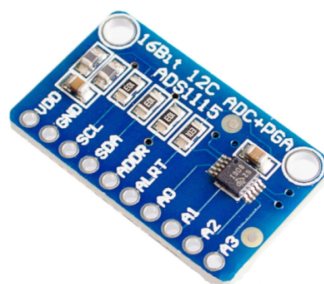


Imagen 24: ADS1115

6.3.4 – Prototipo

Arduino es una placa de desarrollo de entrada/salida. Permite enviar y recibir señales analógicas y digitales a los dispositivos que se conectan a ella. Además dispone de un entorno de desarrollo desde el que programar este flujo de señales así como operaciones matemáticas y algoritmos.

Para este proyecto se ha elegido la placa Arduino DUE, que tiene mayor capacidad de proceso y RAM que las placas más básicas como el Arduino UNO. A la placa arduino se conectan los distintos componentes descritos anteriormente, acelerómetro y ADC, así como un adaptador MicroSD de Adafruit y una pantalla LCD 84x84-Nokia 5510 de Sparkfun, que sirven para registrar la señal digitalizada por el ADC en archivos de texto y para visualizar datos por pantalla, respectivamente.

La salida analógica del sensor ADXL337(eje Z), se conecta a la entrada del ADC, el ADS1115, que se comunica con la placa Arduino mediante un bus de comunicación I2C. El adaptador MicroSD se conecta al bus hardware SPI y la pantalla a un bus por software SPI usando los pines digitales. El esquema completo de las conexiones del prototipo se ha esquematizado usando el software *Fritzing*:

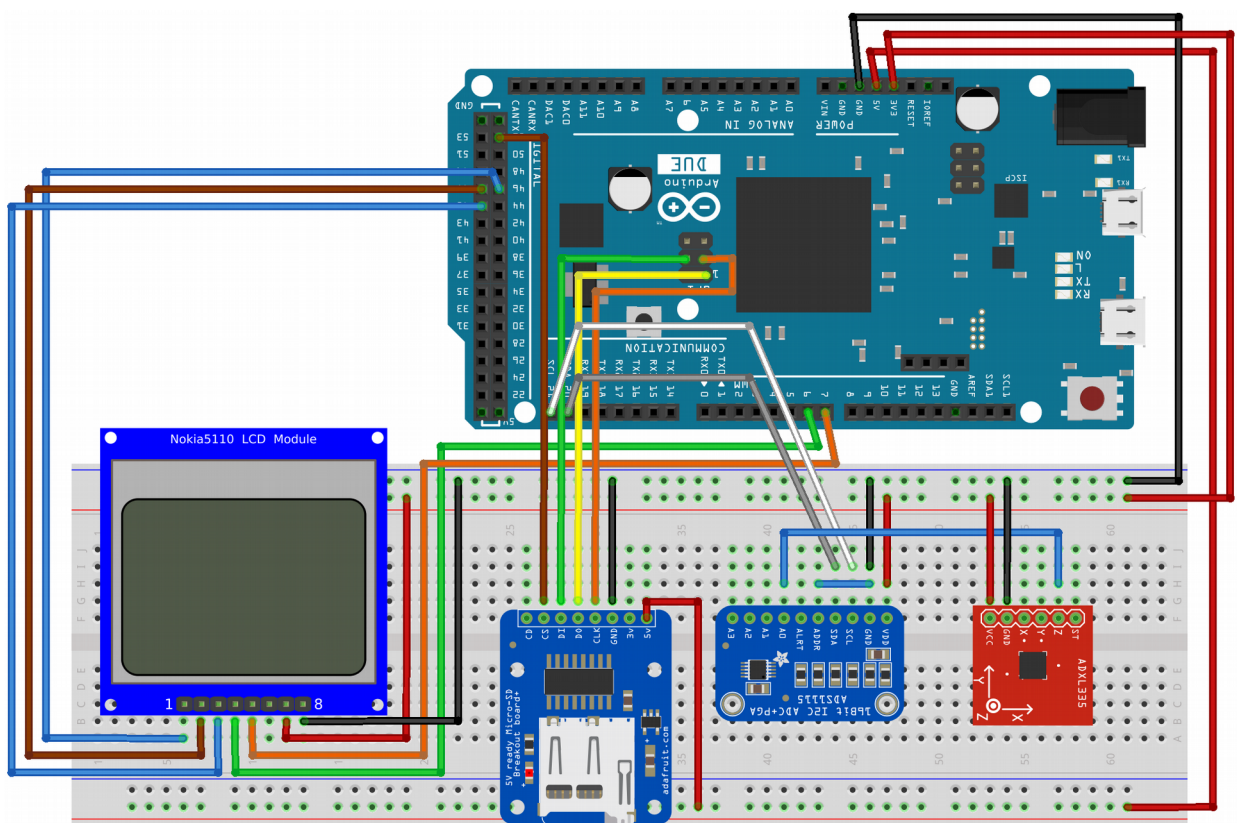


Imagen 25: Esquema prototipo

El código del prototipo, con referencias a las librerías usadas se encuentra en Anexo 9.2.

El programa que se le ha cargado a la placa se encarga de samplear la señal del sensor ADXL337 convertida a digital por el ADS1115 a 512Hz, es decir 512 tomas por segundo. El sampleo de la señal se realiza mediante la implementación de un timer por software que dispara una rutina de lectura del dato del sensor 512 veces por segundo. La implementación del timer por hardware entraba en conflicto con la librería de lectura de datos del ADS1115, por lo que finalmente se tuvo que optar este método.

Cada segundo, los 512 datos almacenados en una matriz, se almacenan en un archivo de texto de la tarjeta SD. La pantalla sirve para indicar en cada momento qué archivo se está guardando, de tal forma que se pueda hacer un seguimiento durante la campaña de toma de datos de a qué rango de archivos corresponde cada punto de medición.

A fin de tener una referencia de la frecuencia fundamental más destacada en cada punto de medida, se implementa una librería que calcula la transformada rápida de fourier cada segundo, mostrándola en pantalla. El sistema tiene por tanto dos modos de uso: uno, en tiempo real, en el que se obtiene un valor orientativo de la frecuencia fundamental más destacada en el punto de medida; y otro, que permite analizar a posteriori la señales a partir de los archivos guardados en la tarjeta SD

Para su funcionamiento autónomo el sistema necesita alimentarse con una batería externa de 5V mediante la entrada microUSB del Arduino DUE.

El prototipo se desarrolló inicialmente usando una protoboard, tal y como aparece en el esquema general del prototipo de arriba, que sirve para pinchar los distintos elementos y cablear desde ahí a la placa de Arduino. En una segunda fase, se encargó una placa de conexiones que permitía sustituir el cableado por pines de conexión, eliminando ruido en las señales, además de disminuir el tamaño y mejorar su facilidad de uso. El acelerómetro del sistema, el ADXL337, puede registrar aceleraciones en las tres direcciones (X, Y y Z). En este trabajo solo se registran las aceleraciones verticales (eje Z), por tanto el acelerómetro se dispone en paralelo a la base.

Finalmente, se colocan las placas dentro de un cajetín plástico, sobre una base de aluminio con patas ajustables, que le da estabilidad y permite calzar los apoyos. El lateral del cajetín es registrable, permitiendo conectar la batería externa y extraer la tarjeta SD.



Imagen 26: Prototipo



Imagen 27: Cajetín

6.4 – Toma de datos

En esta fase se registran las vibraciones del tablero central del puente Isabel II. La toma de datos se realiza colocando y calzando el dispositivo sobre el puente. La elección de los puntos del puente en los que se realizarán los registros se determina a partir del análisis modal obtenido mediante SAP2000. La siguiente imagen, correspondiente a los cuatro primeros modos de vibración de las cuatro primeras frecuencias fundamentales, sirve para planificar la colocación del sistema. Esto es, se eligen aquellos puntos del tablero del puente en los que, para cada modo de vibración, se preveen mayores desplazamientos.

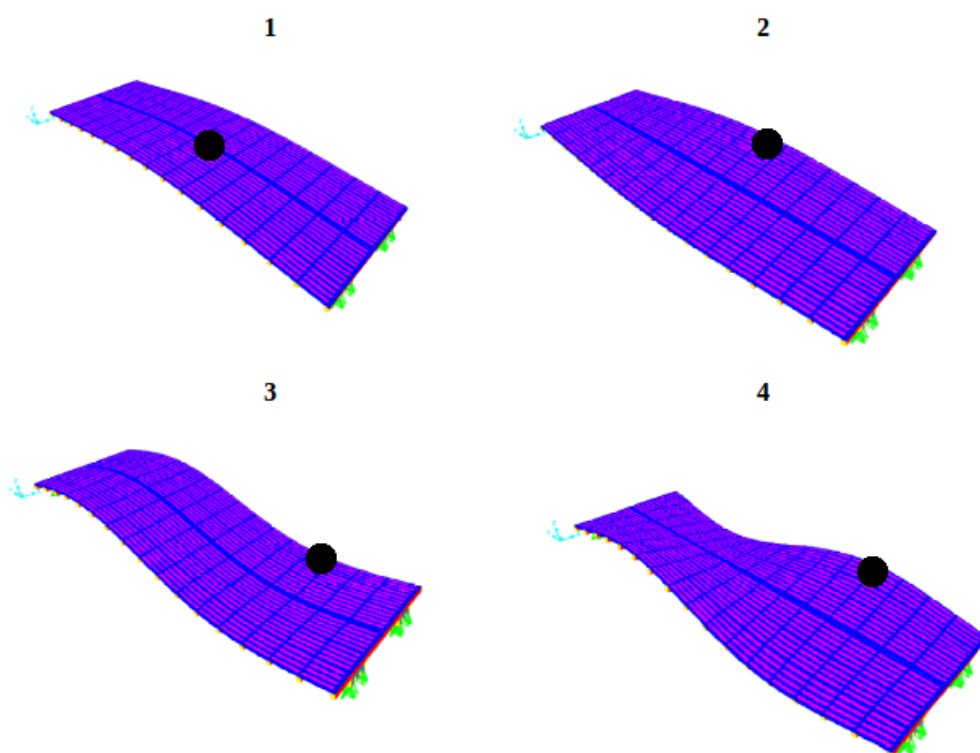


Imagen 28: Planificación colocación de sistema para los ensayos

La campaña de toma de datos se realiza, por tanto en tres puntos representativos. El primero es el que corresponde al centro del tablero, donde se debería de poder registrar de forma destacada la frecuencia fundamental del primer modo. El segundo punto de toma de datos corresponde a la parte central del lateral del tablero. En este punto se deberían de registrar los cuatro modos de vibración. El tercer punto de toma de datos, marcado como punto negro en la imagen anterior en las modos 3 y 4, debería de registrar más claramente los modos 3 y 4, con respecto a los dos primeros.

En las siguientes imágenes, se recogen un par de fotos de la campaña. La primera corresponde a la toma de datos del primer punto de medición, lo más proximo posible al centro del tablero. En este punto no fue posible colocar el sistema justo en el centro ya que coincide con la via de tráfico rodado, así que se colocó en el lateral del carril bici a unos 3 metros del eje central longitudinal del puente. En la segunda foto, se recoge una instantánea del sistema, en la que se aprecian los datos que se van mostrando en pantalla durante las mediciones. Aquí se indica, la frecuencia de muestreo, 512Hz, el número del archivo de registro de señales que se está procesando en ese momento, y el resultado estimado de la frecuencia dominante en ese punto, que en esa foto es de 2,73Hz, correspondiente como se verá luego, a la segunda frecuencia fundamental extraída de los ensayos.



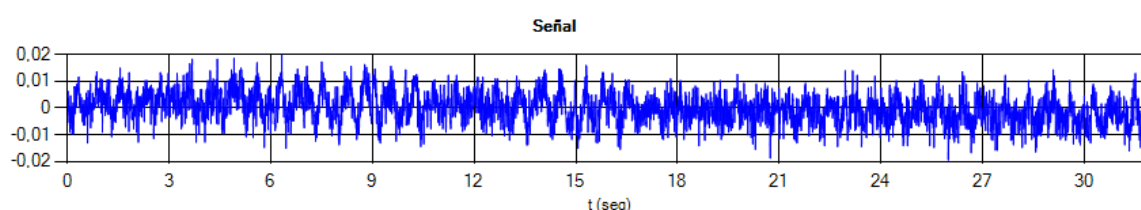
Imagen 29: Ensayos en la parte central del tablero



Imagen 30: Detalle prototipo durante ensayos

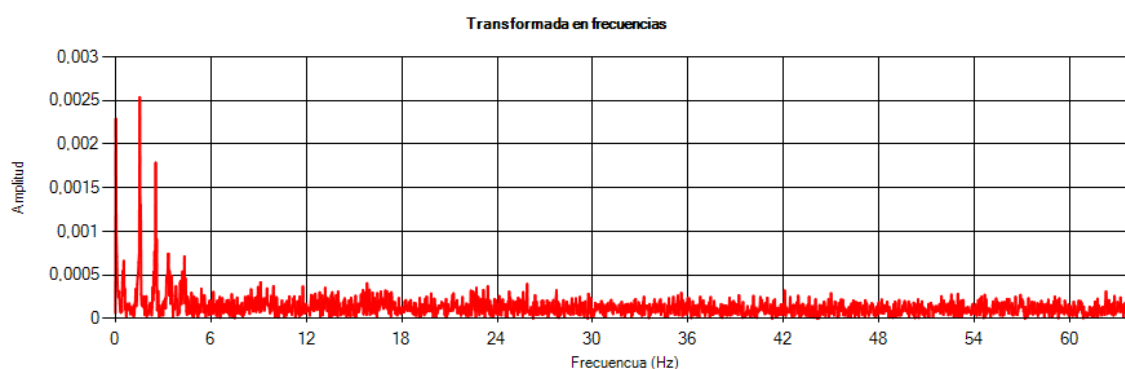
6.5 – Análisis de datos

Los datos obtenidos mediante el sistema de medición, esto es, las aceleraciones registradas en el eje Z, se muestran en el siguiente acelerograma, que representa la evolución de la aceleración en el tiempo durante el registro de datos. Este acelerograma en concreto corresponde al obtenido de los registros del segundo punto de medición.



Imágen 31: Registro aceleraciones punto 2 de medición

A partir de los datos de aceleración en el dominio del tiempo, se obtienen las frecuencias fundamentales mediante la transformada discreta de Fourier (DFT). La DFT se ha realizado usando el software Transform, desarrollado por los ingenieros de la web Estructurando (Agudelo Zapata, José antonio y Boixader Cambroner, David, 2014) y disponible a través de su área de descargas:



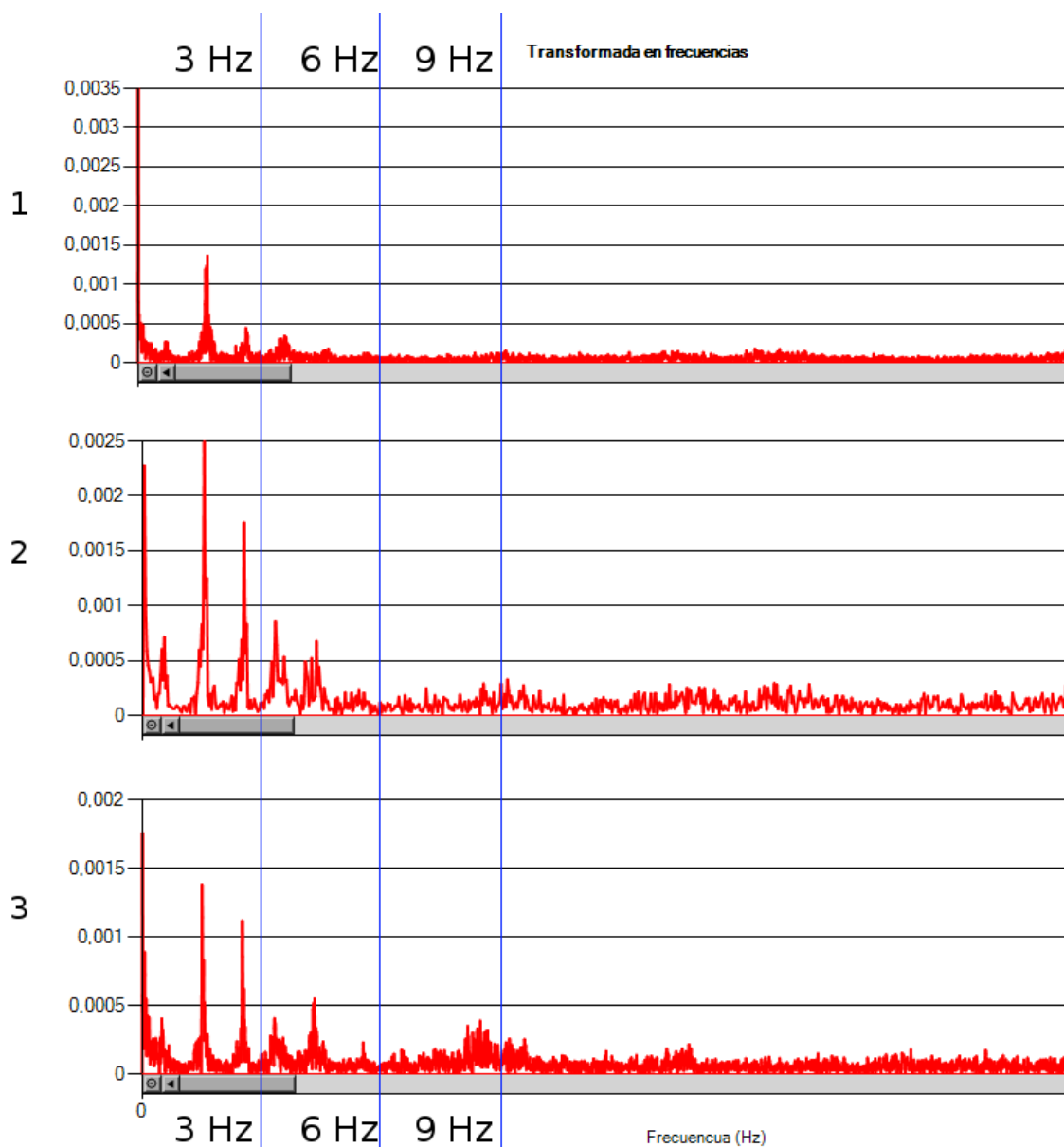
Imágen 32: DFT punto 2 de medición

Los picos que se observan en la gráfica de la transformada de la imagen de arriba, corresponden a las frecuencias fundamentales de vibración. Estas son las frecuencias fundamentales obtenidas de las vibraciones registradas en el segundo punto. A esta técnica de análisis de datos operacionales descrita anteriormente, es la denominada *Peak Picking*. Análogamente, para los puntos 1 y 3 de toma de datos definidos en la campaña, se obtienen sus transformadas de Fourier y de éstas las frecuencias fundamentales.

Con la obtención de las frecuencias fundamentales de las vibraciones registradas en el puente, bajo condiciones de servicio, se finaliza por tanto el proceso de análisis modal operacional, usando el método de análisis de señales *Peak Picking* basado en la aplicación de la transformada discreta de Fourier (DFT).

6.6 – Análisis y valoración de resultados

A continuación se muestran las gráficas de las transformadas discretas de Fourier de las señales registradas en los tres puntos de medición (1, 2 y 3) durante los ensayos. Para facilitar la lectura, se han dispuesto las tres gráficas una encima de otra y se han dibujado unas líneas azules con frecuencias de referencia a 3, 6, y 9 Hz.



Imágen 33: DFT de los tres puntos de medición de la campaña

Como se puede observar, las gráficas de las transformadas de las señales registradas en los tres puntos, muestran picos similares en las frecuencias 1,5Hz / 2,5Hz / 3,5Hz / 4,4Hz. Según el método *Peak Picking*, estos picos se corresponderían con las frecuencias fundamentales de la estructura.

Comparamos ahora estos resultados con los obtenidos mediante análisis modal por FEM con el programa SAP2000, recogidos en la siguiente tabla.

	OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	Frequency Cyc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad2/sec2
▶	MODAL	Mode	1	0,380367	2,62904250...	16,5187612...	272,869472...
	MODAL	Mode	2	0,272743	3,66645134...	23,0369932...	530,703058...
	MODAL	Mode	3	0,159539	6,26807591...	39,3834824...	1551,05869...
	MODAL	Mode	4	0,124464	8,03447811...	50,4821148...	2548,44391...

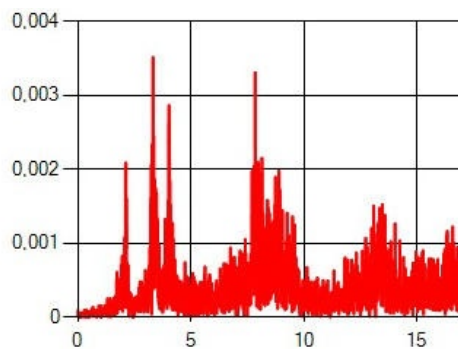
Imágen 34: Análisis modal por FEM: frecuencias fundamentales

Las frecuencias fundamentales de los 4 primeros modos obtenidos por FEM serían 2,6Hz / 3,6Hz / 6,2Hz / 8Hz. Estas frecuencias son sustancialmente mayores que las frecuencias obtenidas mediante ensayos. En la siguiente tabla se resumen las frecuencias obtenidas por ensayos y por FEM y el % de desviación que presentan entre ellas.

Modo	Ensayos	FEM	Desviación
1	1,5Hz	2,6Hz	73%
2	2,5Hz	3,6Hz	44%
3	3,5Hz	6,2Hz	77%
4	4,4Hz	8Hz	81%

La discordancia entre los resultados obtenidos mediante ensayos y los obtenidos mediante FEM indican que el modelo numérico caracterizado en SAP tiene mayor rigidez estructural que la estructura del puente. Esto puede ser debido a varias causas:

Hipótesis A / Los datos recogidos por el sistema de medición desarrollado en el actual trabajo son inexactos. Esta hipótesis se descartó mediante el registro de datos con otros sensores, en este caso de teléfonos móviles, que suelen registrar correctamente a bajas frecuencias (Feng & Fukuda & Mizuta, 2015, p 14)



Imágen 35: DFT datos Smartphone

Los análisis DFT de estos registros muestran unos picos de frecuencias en el rango de las frecuencias registradas por el sistema. La imagen previa recoge los picos registrados por un teléfono móvil sobre el lateral del puente, donde se puede observar, que las tres primeras frecuencias son muy similares a las obtenidas con el prototipo.

Hipótesis B / Los planos que se han usado como referencia en la realización del modelo numérico han podido sufrir modificaciones en las últimas fases de proyecto y/o construcción. En tal caso, cabría la posibilidad de que algunos de los elementos del puente se contruyesen finalmente con menor espesor, dotando a la estructura de menor rigidez. Esta hipótesis se ha descartado, porque se han realizado varias simulaciones reduciendo los espesores de los elementos que forman la estructura sin cambios notables en las frecuencias. Para obtener cambios significativos hay que realizar una simulación reduciendo el espesor de las vigas cajón un 30%, hasta 9mm en los laterales y 20mm en su cara inferior, lo que no parece demasiado realista. Los resultados que se obtienen con esos espesores son los siguientes:

Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
2,1Hz	2,8Hz	4,6Hz	6,2Hz

Hipótesis C / Desde su construcción en 1974, el puente ha perdido rigidez debido al deterioro de las uniones o a la corrosión de algunos elementos.

Hipótesis D / La caracterización de los apoyos del modelo numérico es incorrecta. En el modelo de SAP2000 los apoyos se han definido como apoyos articulados, es decir, con giros permitidos en los tres ejes y desplazamientos impedidos en los tres ejes. Sin embargo, los apoyos del tablero están resueltos con bloques de elástómero (neopreno), que permiten un cierto amortiguamiento de la estructura, reduciendo la rigidez de la misma.

6.7 – Actualización del modelo

A fin de completar el ciclo completo de análisis modal del puente, en este apartado se adapta el modelo numérico del puente, reduciendo su rigidez, para aproximar los resultados FEM a los obtenidos por ensayos. Para ello se ha supuesto como válida la *hipótesis D* en relación a la discordancia de rigideces entre la estructura construida y el modelo numérico.

La actualización del modelo numérico consiste en la reformulación de los apoyos rígidos del modelo original, que se sustituyen por apoyos de neopreno con un cierto grado de amortiguamiento. El programa SAP2000 permite definir los apoyos como apoyos amortiguados o muelles (springs) a partir de sus módulos de rigidez vertical, K_v y horizontal, K_h . Dado que en este análisis las acciones que actúan sobre el puente son exclusivamente verticales, en la caracterización de estos apoyos se calcula únicamente el módulo de rigidez vertical que hay que asignarles, suponiendo el apoyo rígido en el plano horizontal.

La rigidez vertical viene dada por la siguiente fórmula (Ramirez, 2016, p 30):

$$K_v = \frac{E_c A}{t_r}$$

donde:

E_c = Módulo de compresión instantáneo del apoyo, bajo el nivel de carga especificada

A = Área total de la sección transversal del apoyo ($L \times W$)

t_r = Espesor total efectivo del caucho del apoyo

Y el módulo de compresión por la siguiente (Sheridan, James y Miller, 2012, p 265):

$$E_c = E_0 (1 + 2\Phi S^2) \text{ for bidirectional strain (blocks)}$$

E_c depende de E_0 (módulo de young), de Φ y de S (factor de forma). De la tabla de (Sheridan et al, 2012, p 266) obtenemos $E_0 = 4344 \text{ kPa}$ y $\Phi = 0,57$ suponiendo que el material elastómero tiene una rigidez media. El factor de forma S se calcula según (Sheridan et al, 2012, p 266):

$$S = \frac{A_L}{A_B} = \frac{(\text{length}) (\text{width})}{2t(\text{length}) + 2t(\text{width})}$$

Se parte de un apoyo de 0,6 x 0,4 m con 12 nudos. Así que se calcula el K_v de cada nudo suponiendo que su área de apoyo es de 0,03m² (0,17m x 0,17m), que su espesor es de 0,06m y que tiene 4 capas ($t=4$).

Con estos datos resulta un factor de forma, $S = 0,011$, un $E_c = 4400 \text{ KN/m}^2$ y un $K_v = 2200 \text{ KN/m}$

El factor de rigidez vertical K_v se usa en la definición de 12 apoyos tipo *spring* de cada apoyo de neopreno, dos en cada extremo de cada viga cajón.

Con esta nueva definición de apoyos, los resultados del cálculo modal por FEM quedarían así:

	OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	Frequency Cyc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad2/sec2
	MODAL	Mode	1	0,637306	1,56910412...	9,85897195...	97,1993280...
	MODAL	Mode	2	0,504754	1,98116170...	12,4480061...	154,952856...
	MODAL	Mode	3	0,260652	3,83653596...	24,1056664...	581,083153...
	MODAL	Mode	4	0,237254	4,21489230...	26,4829494...	701,346609...

Imágen 36: Frecuencias fundamentales del modelo actualizado

Las frecuencias fundamentales de esta solución para los 4 primeros modos obtenidos por FEM serían, redondeando, 1,6Hz / 2Hz / 3,8Hz / 4,2Hz. Estas frecuencias son ahora bastante parecidas a las frecuencias obtenidas mediante ensayos. En la siguiente tabla se actualizan las frecuencias obtenidas por ensayos y por FEM, del modelo modificado, y el nuevo % de desviación que presentan:

Modo	Ensayos	FEM	Desviación
1	1,5Hz	1,6Hz	13%
2	2,5Hz	2Hz	20%
3	3,5Hz	3,8Hz	8%
4	4,4Hz	4,2Hz	5%

7 – Conclusiones

El desarrollo del sistema propuesto permite obtener las frecuencias fundamentales de las vibraciones que se producen en el eje vertical de una estructura. La verificación de los datos registrados mediante ensayos comparándolos con los datos obtenidos por el análisis modal por FEM del modelo analítico del caso de estudio confirman la validez del sistema.

En el contexto tecnológico actual resulta viable, por tanto, desarrollar y validar prototipos de sistemas de medición de frecuencias fundamentales de bajo coste como el propuesto en el actual trabajo. El entorno de desarrollo de Arduino, el ecosistema de placas de evaluación de sensores y dispositivos disponibles así como la disponibilidad de herramientas de cálculo por FEM que pueden realizar un análisis modal en cuestión de minutos con ordenadores convencionales, lo hacen posible. Desarrollar estos sistemas usando plataformas abiertas como Arduino, permite además compartir los diseños y la programación de estos sistemas, produciendo una secuencia evolutiva que puede ir incorporando mejoras y funcionalidades en cada nueva versión.

El coste total del sistema de medición desarrollado está por debajo de los 60€ y permite sustituir los sensores por otros de mejores características o más apropiados para el registro de vibraciones de otro tipo de estructuras. Además, al sistema se le pueden añadir dispositivos de redes que permitan el envío de las señales registradas a la nube mediante Wifi o 4G. Esta versatilidad en sus características y prestaciones son las principales ventajas que presenta con respecto al uso de otros dispositivos de bajo coste, como los smartphones, que además de resultar más costosos, presentan limitaciones en cuanto a las características de los sensores que llevan incorporados, principalmente el ancho de banda.

Con respecto al modelado y cálculo por FEM del caso de estudio cabe destacar la importancia de los resultados obtenidos en la aplicación de las técnicas de análisis modal que más concretamente han servido para:

- Conocer el compartimiento dinámico del puente, especialmente las formas que adopta cuando vibra.
- Reconocer qué elementos de la estructura del puente influyen en mayor grado en el modo de vibrar del mismo, esto es, su geometría, sus materiales y sus apoyos.
- Validar los ensayos experimentales, resultando ser una técnica complementaria a los ensayos de gran interés.
- Confirmar la dificultad que reside en la definición de modelos analíticos para el cálculo por FEM que respondan de manera equivalente a la estructura construida.

8 – Futuras investigaciones

Esta trabajo aborda diversas técnicas y procedimientos, y plantea por tanto, varias líneas de desarrollo futuro:

Caracterización modal y estructural del puente Isabel II

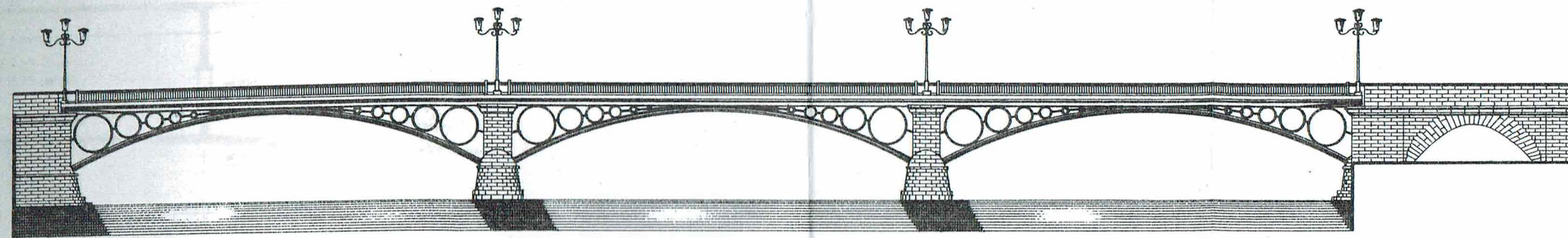
- Tomando como base el trabajo de modelado y caracterización realizado, sería interesante poder completar el modelado del puente mediante un estudio más exhaustivo de su construcción. En este sentido se trataría de añadir al modelo otros elementos no tenidos en cuenta en el presente trabajo, como los anillos inferiores, así como definir con mayor precisión los viales en cuanto a materiales, espesores, etc. En este apartado incluiría un estudio pormenorizado de los apoyos de neopreno del puente que tenga en cuenta las rigideces horizontales de los mismos.
- Realizar un estudio ampliado de las vibraciones del puente con sensores de mayor precisión reajustando el modelo analítico en caso necesario.

Continuación del desarrollo del prototipo del sistema de medición

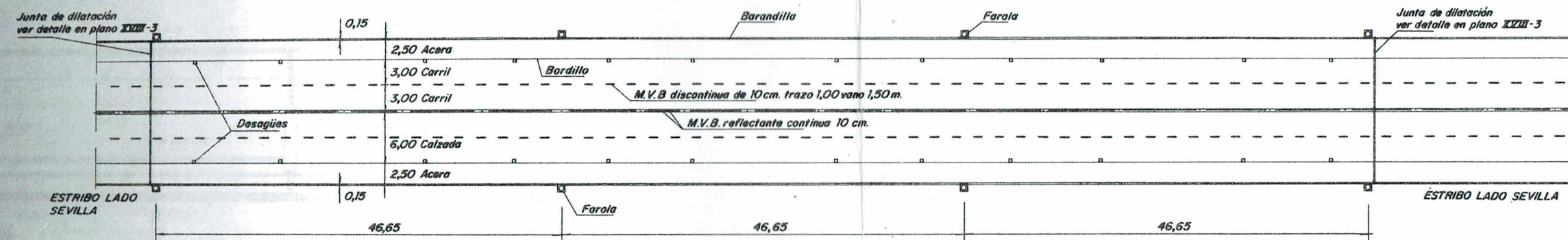
- Incorporar al equipo el registro de las señales en los ejes X e Y, de tal forma que el sistema pueda servir para calcular frecuencias de vibración en los tres ejes.
- Incorporar módulos de comunicación y software al prototipo para poder enviar las señales registradas a la nube o a plataformas de IoT convencionales, para su análisis posterior o para disponer de un sistema de alertas.
- Sustitución del sensor y ADC por otros componentes de mejores características: ruido, resolución, etc. Y estudiar la necesidad de añadir filtros de ruido a la señal analógica de los sensores.
- Implementar un doble procesador que permita la realización del cálculo DFT en paralelo a la toma de datos
- Implementar un sistema opcional de alimentación autónoma mediante baterías y placa solar

9 – Anexos

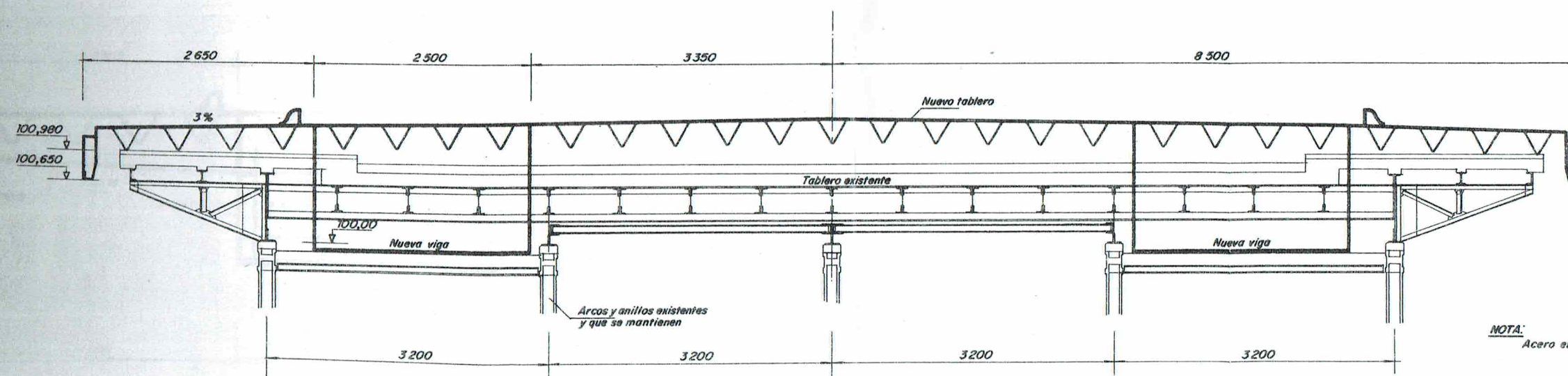
9.1 – Planos puente Isabel II, Sevilla



ALZADO
ESCALA 1:600

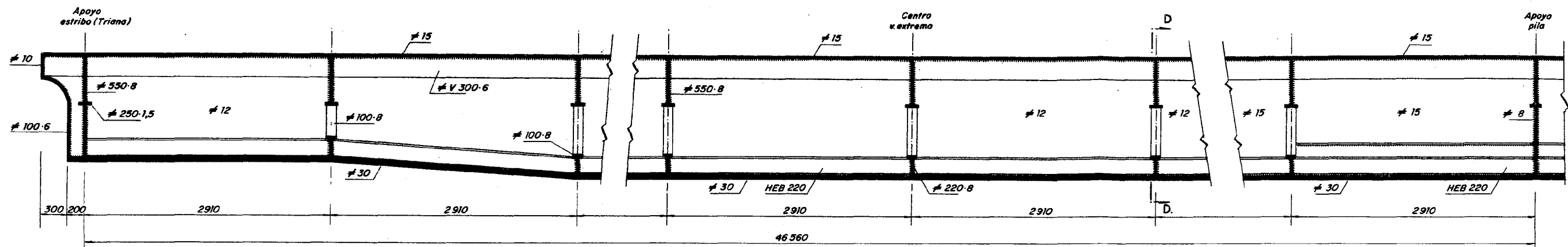


PLANTA
ESCALA 1:600

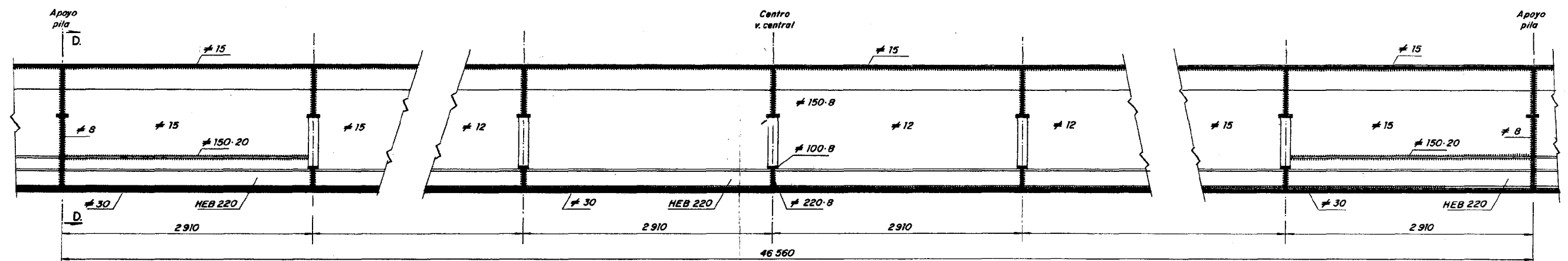


SECCION TRANSVERSAL
ESCALA 1:60

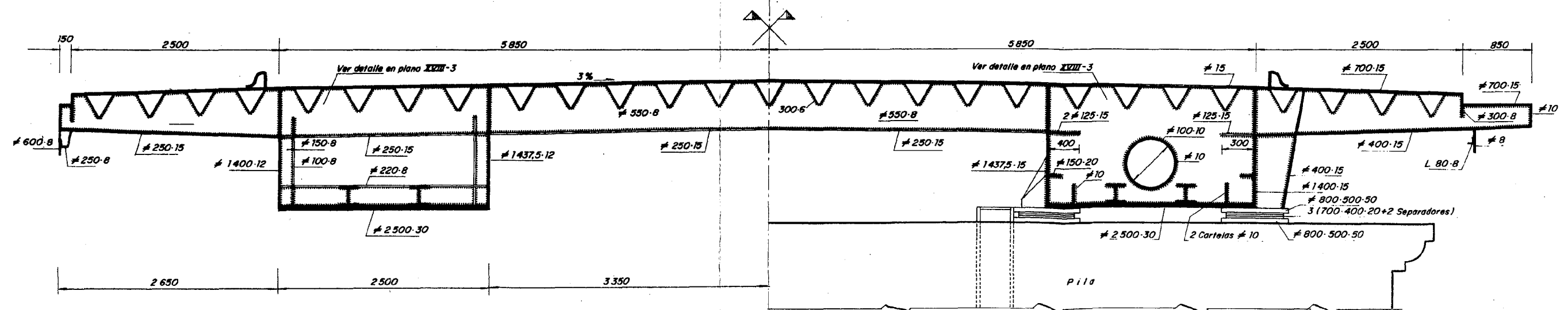
NOTA:
Acero en chapas calidad A-42 c



VANO EXTREMO LADO TRIANA
ESCALA 1:50

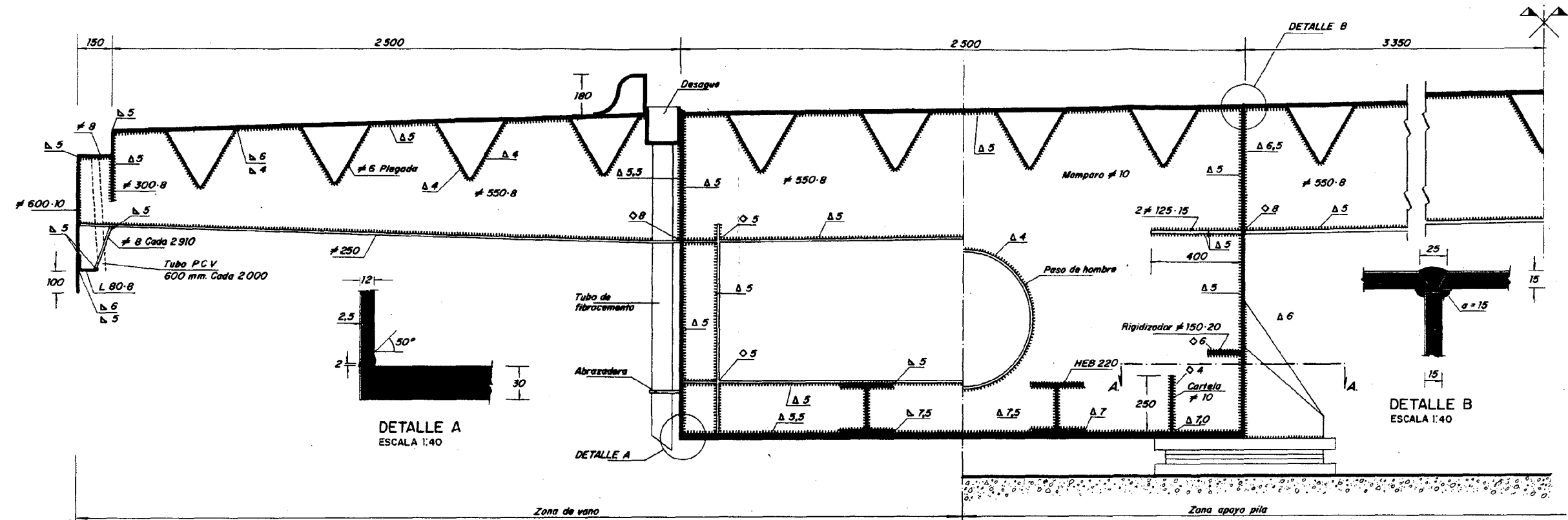


VANO CENTRAL
ESCALA 1:50

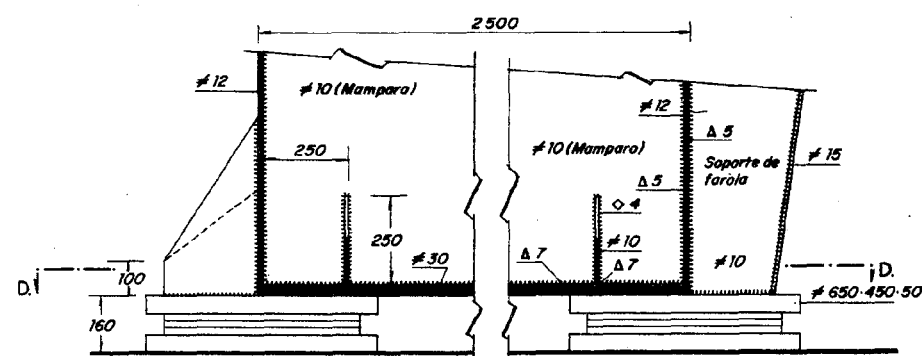


SECCION A-A
ESCALA 1:50

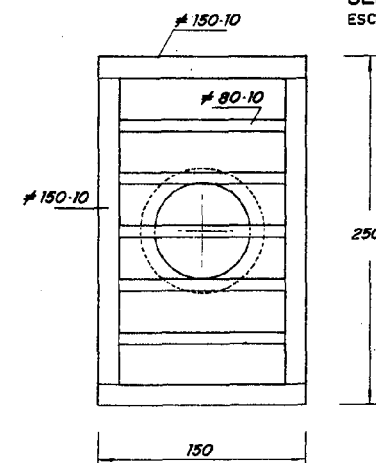
SECCION D-D
ESCALA 1:50



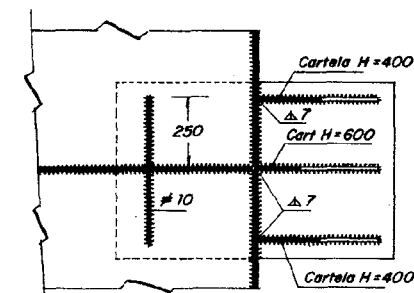
SEMI-SECCION TRANSVERSAL
ESCALA 1:20



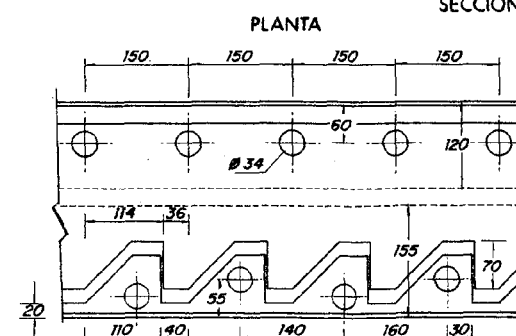
SECCION C-C
APOYO ESTRIBO



DESAGÜE

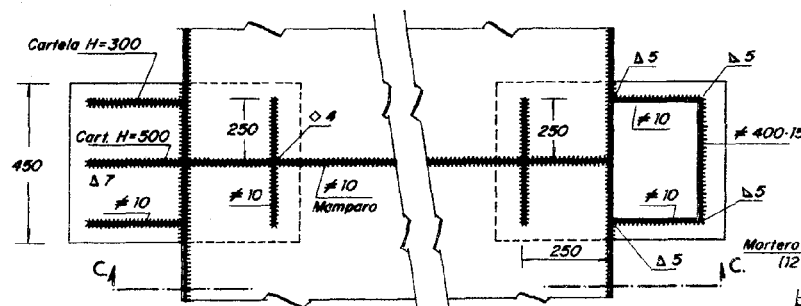


SECCION A-A

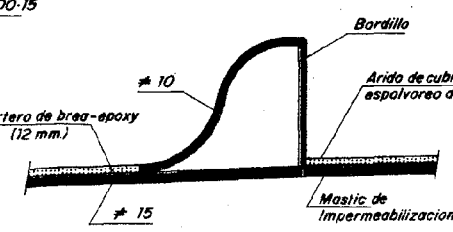


PLANTA

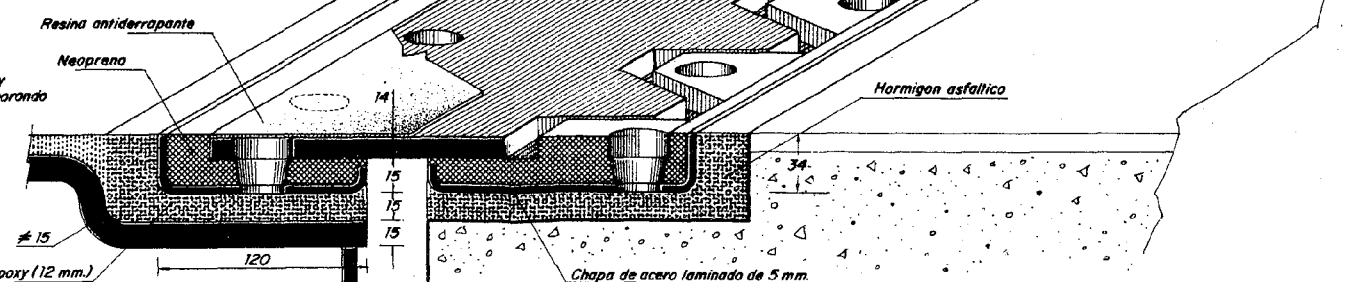
PERSPECTIVA JUNTA DILATACION



SECCION D-D



DETALLE DE PAVIMENTO Y
BORDILLO



9.2 – Programa de Arduino

/*

Project: Isabel_II.ino

List of libraries used in this project:

<https://github.com/olewolf/geophone>

<https://github.com/kosme/arduinoFFT>

<https://github.com/toxnico/DMTimer>

<https://github.com/adafruit/Adafruit-GFX-Library>

<https://github.com/adafruit/Adafruit-PCD8544-Nokia-5110-LCD-library>

<https://github.com/jrowberg/i2cdevlib/tree/master/Arduino/ADS1115>

*/

//dtimer

#include <dmtimer.h>

//FFT

#include "arduinoFFT.h"

//ads1115

#include "ADS1115.h"

//spi

#include <SPI.h>

//display

#include <Adafruit_GFX.h>

#include <Adafruit_PCD8544.h>

//sd

#include <SD.h>

//dtostrf

#include <avr/dtostrf.h>

//constructor sd

File myFile;

const int chipSelect = 52;

//constructor ads

ADS1115 adc0(0x48);

//constructor display

// Software SPI (slower updates, more flexible pin options):

// pin 7 - Serial clock out (SCLK)

// pin 6 - Serial data out (DIN)

// pin 45 - Data/Command select (D/C)

// pin 47 - LCD chip select (CS)

// pin 46 - LCD reset (RST)

//Adafruit_PCD8544 display = Adafruit_PCD8544(SCLK_PIN,DIN_PIN,DC_PIN,CS_PIN,RST_PIN);

Adafruit_PCD8544 display = Adafruit_PCD8544(7,6,45,47,46);

//constructor timer

#define NUMBER_OF_SAMPLES 512

DMTimer myTimer(1000000/NUMBER_OF_SAMPLES); //Create a timer and specify its interval in microseconds

```
//constructor fft
arduinoFFT FFT = arduinoFFT();

//vars
double lecturabruta;

//accelerometer data sampling rate
const double samplingFrequency = NUMBER_OF_SAMPLES;

//buffer for accelerometer samples
double accelerometer_samples[ NUMBER_OF_SAMPLES];
double accelerometer_samples_imag[ NUMBER_OF_SAMPLES ];

//Indexes used by the interrupt service routine.
int isr_current_geodata_index = 0;

//FFT print indexes
#define SCL_INDEX 0x00
#define SCL_TIME 0x01
#define SCL_FREQUENCY 0x02

//var to stop after X seconds
int stop = 0;

//file to save peak frequencies
String peakfile = "peak.txt";

//0g level
double media = 0;
double zero_level = 0;

//g conversion
//GAIN 1 => 0.125mV / bit
//ADXL337 sensitivity => 371mV / g => 1mV = 0.002695g
//1 bit = 0.125mV = 0.125 * 0.002695g = 0.00033692 g
double bitconvg = 0.00033692;

//time
unsigned long StartTime;
unsigned long CurrentTime;
unsigned long ElapsedTime;

void setup() {

    //init I2C
    Wire.begin();
    //set I2C port clock
    Wire.setClock(1600000L);

    // initialize serial communication
    Serial.begin(115200);
```



```

//init ads1115
adc0.initialize(); // initialize ADS1115 16 bit A/D chip
// We're going to do single shot sampling
adc0.setMode(ADS1115_MODE_SINGLESHOT);
// Set rate / 860 samples per second
adc0.setRate(ADS1115_RATE_860);
// Set the gain (PGA) +/- 4.096V
adc0.setGain(ADS1115_PGA_4P096); // 1x gain +/- 4.096V 1 bit = 0.125mV
//READ A0
// The below method sets the mux
adc0.setMultiplexer(ADS1115_MUX_P0_NG);

//init display
display.begin();
display.setContrast(32);

//init sd and stop if error
if (!SD.begin(chipSelect)) {
  Serial.println("initialization failed!");
  while (1);
}
Serial.println("initialization done.");

//remove peakfile
SD.remove(peakfile);

//0V level
zero_level = 16158.00;
Serial.println("##### 0 level in bits (1g) #####");
Serial.println(zero_level);
Serial.println();

StartTime = millis();
}

void loop() {

if(myTimer.isTimeReached() && stop<1800){ //check if execution time has been reached

//red accelerometer data
lecturabruta = (adc0.getConversionP0GND()- zero_level)*bitconvg;

//fill buffer with data
accelerometer_samples[ isr_current_geodata_index++ ] = lecturabruta;

//When buffer is full, compute FFT
if ( isr_current_geodata_index == NUMBER_OF_SAMPLES )
{

//print loop elapsed time
CurrentTime = millis();
ElapsedTime = CurrentTime - StartTime;
Serial.println(ElapsedTime);

```

```
//save raw data to file, removing previous files
String filename = (String) stop;
filename = filename + ".txt";
Serial.println(filename);
SD.remove(filename);
myFile = SD.open(filename, FILE_WRITE);

// if the file opened okay, write to it:
if (myFile) {
  Serial.print("Writing file...");
  for (uint16_t y = 0; y < NUMBER_OF_SAMPLES; y++)
  {
    //convert float to char to write to file with more than 2 decimals
    char buffer[14]; // 3 min string with decimal, 9 characters after decimal, plus a \0
    dtostrf(accelerometer_samples[y], 3, 9, buffer);
    myFile.println(buffer);
  }
  myFile.close();
  Serial.println("done.");
} else {
  // if the file didn't open, print an error:
  Serial.println("error opening file");
}

// FFT windowing functions
FFT.Windowing(accelerometer_samples, NUMBER_OF_SAMPLES, FFT_WIN_TYP_HANN, FFT_FORWARD);

//FFT compute
FFT.Compute(accelerometer_samples, accelerometer_samples_imag, NUMBER_OF_SAMPLES, FFT_FORWARD);

//Compute magnitudes
FFT.ComplexToMagnitude(accelerometer_samples, accelerometer_samples_imag, NUMBER_OF_SAMPLES);

//Compute and print major peak frequency
double x = FFT.MajorPeak(accelerometer_samples, NUMBER_OF_SAMPLES, samplingFrequency);

//print peak frequency
Serial.println("Peak frequency:");
Serial.println(x, 6);
Serial.println(" ");

//save peak to file
myFile = SD.open(peakfile, FILE_WRITE);
if (myFile) {
  Serial.print("Writing file...");
  char bufferpeak[14]; // 4 min string with decimal, 8 characters after decimal, plus a \0
  dtostrf(x, 4, 8, bufferpeak);
  myFile.println(bufferpeak);
  myFile.close();
  Serial.println("done.");
} else {
  // if the file didn't open, print an error:
  Serial.println("error opening file");
}
```

```
//lcd display
display.clearDisplay(); // text display tests
display.setTextSize(1);
display.setCursor(0,0);
display.setTextColor(BLACK);
//display sampling
display.print("Sampling ");
display.print(NUMBER_OF_SAMPLES);
display.println("Hz");
//display name of file saved
display.print("File ");
display.println(stop);
//display peak frequency
display.println("Main frequency");
display.println();
display.setTextSize(2);
display.println(x);
display.display();
display.clearDisplay();

//reset accelerometer_samples_imag
for (uint16_t i = 0; i < NUMBER_OF_SAMPLES; i++)
{
    accelerometer_samples_imag[i]=0;
}

//reset buffer index
isr_current_geodata_index = 0;

//reset time
StartTime = millis();

//increase file name
stop = stop + 1;
}

}

}
```

10 – Bibliografía

Trabajos académicos

Aranda Ruiz, José. (2010). Vibraciones de elementos simples con condiciones de contorno dependientes del tiempo. Proyecto fin de carrera. Ingeniería industrial. Universidad Carlos III de Madrid

Cortés Domínguez, Jesús. 2018. Levantamiento, modelado y recreación virtual del Puente de Isabel II de Sevilla con CATIA V.5. PFC. Ingeniería Industrial. Universidad de Sevilla

Frechilla Alonso, N. (2017). Metodologías para la estimación de los parámetros modales en pasarelas peatonales: aplicación a la pasarela del museo de la ciencia de Valladolid. Tesis. Universidad de Valladolid

Gonzalo Pérez Herreros, Daniel. (2014). Técnicas de monitorización del patrimonio construido: desarrollo y aplicación. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Cantabria

Guerra Pajares, Víctor. (2016). Diseño de un sistema móvil a escala para simular las acciones verticales de los peatones sobre las estructuras. Aplicación a una pasarela peatonal. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales

Miguel Tejada, Alejandro de (2011). Análisis dinámico de estructuras en el dominio de la frecuencia. Tesis. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM).

Pachón García, P. (2016). Evaluación estructural de edificaciones históricas mediante análisis modal operacional (OMA). Tesis. Universidad de Sevilla, Sevilla.

Ramírez Reyes, Fernando. 2016. Evaluación experimental de la capacidad de aislamiento sísmico de los apoyos convencionales de neopreno de un puente vehicular. Facultad de Ingeniería. Universidad autónoma del Estado de México.

Río Fernández, Pablo del. (2015). Creación y validación de un modelo de elementos finitos de una viga mediante análisis modal. Trabajo de Fin de Grado. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Mecánica

Rodríguez Súnico, Manuel. 2005. Análisi modal operacional: teoría y práctica. PFC. Escuela superior de Ingenieros. Universidad de sevilla

Solano Guerra, Abdel. 2016. Identificación de sistemas estructurales a partir de pruebas modales. Trabajo de diploma. Facultad de Construcciones. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas

Urruticoechea Olloquiegui, Pablo (2018). Análisis del comportamiento dinámico de una estructura ligera sometida a la acción de un peatón. Trabajo Fin de Grado. Grado en ingeniería en tecnologías industriales. Universidad Politécnica de Madrid

Vasheghani Farahani, Reza. (2013). Structural Health Monitoring and Damage Identification of Bridges Using Triaxial Geophones and Time Series Analysis. PhD diss., University of Tennessee.

Vázquez Vicente, Enrique. (2015) Aplicaciones del análisis modal a la peritación de edificios civiles con estructura de fábrica. El caso de la edificación civil sevillana. Tesis. Universidad de Sevilla, Sevilla.

Artículos de revistas

Dominguez Caicedo, Mauricio. (2014). Períodos de vibración de las edificaciones. Revista de Arquitectura e ingeniería. 2014. Vol 8. No 2. ISSN: 1990-8830/RNPS 2125

Feng, M., Fukuda, Y., Mizuta, M., & Ozer, E. (2015). Citizen sensors for SHM: use of accelerometer data from smartphones. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 15(2), 2980–2998. doi:10.3390/s150202980

Jo, Hongki & Bridge, Jennifer & Spencer, Billie & Nagayama, Tomonori. (2010). Development of a High-sensitivity Accelerometer Board for Structural Health Monitoring. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. DOI: 10.1117/12.848905

Pakzad, Shamim & Kim, Sukun & L Fenves, Gregory & D. Glaser, Steven & Culler, David & W. Demmel, James. (2005). Multi-Purpose Wireless Accelerometers for Civil Infrastructure Monitoring.

Soler Llorens, J.L, Galiana Merino, J.J, Giner Caturla, J, Jauregui Eslava, P, Rosa Cintas, S, Rosa Herranz, J. (2016). Development and programming of Geophonino: A low cost Arduino-based seismic recorder for vertical geophones. *Computers & Geosciences, Volume 94*, 1-10. DOI: 10.1016/j.cageo.2016.05.014. ISSN 0098-3004

Zhu, Li & Fu, Yuguang & Chow, Raymond & Spencer, Billie & Woong Park, Jong & Mechitov, Kirill. (2018). Development of a High-Sensitivity Wireless Accelerometer for Structural Health Monitoring. *Sensors*. DOI: 10.3390/s18010262

Libros

Argüelles Álvarez, Ramón. 1982. La estructura metálica hoy, tomo II, proyectos y planos. ISBN-9788460056737

Sheridan, Patrick M., James, Frank O., and Miller, Thomas S. 2012. Design of Components. En Gent, Alan N (Autor). Engineering with Rubber (pp 223-250). München. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. ISBN-9783446428713

Web a 15/06/2019

Agudelo Zapata, José antonio y Boixader Cambroner, David. 2014. Cómo obtener las frecuencias fundamentales de una estructura con tu Smartphone. URL: <http://estructurando.net/2014/06/23/como-obtener-las-frecuencias-fundamentales-de-una-estructura-con-tu-smartphone/>

Adafruit GFX library. URL:

<https://github.com/adafruit/Adafruit-GFX-Library>

Adafruit Nokia 5110 LCD library. URL:

<https://github.com/adafruit/Adafruit-PCD8544-Nokia-5110-LCD-library>

ADS1115 library from I2Cdevlib project. URL:

<https://github.com/jrowberg/i2cdevlib/tree/master/Arduino/ADS1115>

Arduino FFT library. URL:

<https://github.com/kosme/arduinoFFT>

Arduino DMTimer Library. URL:

<https://github.com/toxnico/DMTimer>

Arduino I2Cdevlib library. URL:

<https://github.com/jrowberg/i2cdevlib>

Code and Arduino shield for a frequency analyzer for geometric sensors. URL:

<https://github.com/olewolf/geophone>

Especificaciones acelerómetro Silicon design 1521. URL:

<https://drive.google.com/file/d/0B4eVto02URUhYnQ0RXMtUHNpUIU/view>

Especificaciones acelerómetro Analog devices ADXL 354. URL:

<https://www.digikey.com/en/product-highlight/a/analog-devices/adxl354-adxl355-3-axis-mems-accelerometers>

Especificaciones acelerómetro STMicroelectronics LIS344ALH. URL:

<https://www.mouser.es/ProductDetail/STMicroelectronics/LIS344ALH>

Especificaciones acelerómetro Murata SCA 3300. URL:

<https://www.mouser.es/ProductDetail/Murata-Electronics/SCA3300-D01-1>

Especificaciones y tutoriales acelerómetro ADXL337. URL:

<https://www.sparkfun.com/products/12786>

Especificaciones y tutoriales ADC ADS1115. URL:

<https://www.adafruit.com/product/1085>

Especificaciones y tutoriales LCB 84x84 Nokia 1550. URL:

<https://www.sparkfun.com/products/10168>

Especificaciones y tutoriales MicroSD card breakout. URL

<https://www.adafruit.com/product/254>

11 – Índice de imágenes

Imágen 1. Vibraciones del puente Tacoma, 1940.

Fuente: <https://vox.lacea.org/?q=de-los-brics-los-biits>

Imágen 2. Modos de vibración.

Fuente: <http://ingenieriasismicaylaconstruccioncivil.blogspot.com/2013/08/modos-de-vibracion-de-un-edificio.html>

Imágen 3. Esquema análisis modal operacional.

Fuente: [http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/7109/Tesis Abdel Solano Guerra.pdf](http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/7109/Tesis%20Abdel%20Solano%20Guerra.pdf)

Imágen 4. Señal en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Analisis-de-Frecuencia-en-el-Modo-Torsion-a-Senal-en-el-dominio-del-tiempo_fig1_268434228

Imágen 5. Espectro de frecuencias

Fuente: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/intro-to-mems-vibration-monitoring.html>

Imágen 6. Señal compuesta por varios armónicos

Fuente: <http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/fgarnav/files/2015/11/intoducion-a-la-radiocomunicaciones.pdf>

Imágen 7. Punte de Barcas. 1851

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Puerta_de_barcas_001.jpg

Imágen 8. Situación puente Isabel II, Sevilla

Fuente: <https://www.openstreetmap.org>

Imágen 9: Alzado y planta proyecto Juan Batanero, 1974

Fuente: Argüelles Álvarez, Ramón. 1982. *La estructura metálica hoy, tomo II, proyectos y plano*. ISBN-9788460056737.

Imágen 10. Puente Isabel II. 2019

Fuente: propia

Imágen 11. Viario, carril bici y acerado del puente Isabel II. 2019

Fuente: propia

Imágen 12. Detalle viga cajón, vano central puente

Fuente: Argüelles Álvarez, Ramón. 1982. *La estructura metálica hoy, tomo II, proyectos y plano*. ISBN-9788460056737.

Imágen 13. Render de detalle viga cajón, mamparos, HEB refuerzos y vigas transversales ortótropo.

Fuente: propia

Imágen 14. Detalle encuentro viga cajón con tablero ortótropo

Fuente: Argüelles Álvarez, Ramón. 1982. *La estructura metálica hoy, tomo II, proyectos y plano*. ISBN-9788460056737.

Imágen 15. Render de detalle tablero ortótropo.

Fuente: propia

Imágen 16. Detalle despiece 3DCARA: ortótropo, viga cajón, perfiles HEB y mamparos

Fuente: propia

Imágen 17. Secciones de área en SAP2000

Fuente: propia

Imágen 18. Definición sección multicapa de la cara superior de las vigas ortótropo

Fuente: propia

Imágen 19. Detalle apoyos y despiece shells, ocultando mamparos

Fuente: propia

Imágen 20. Efecto vibración en ausencia de mamparos de rigidización

Fuente: propia

Imágen 21. Resultado análisis modal: frecuencias fundamentales

Fuente: propia

Imágen 22. Análisis modal: modos de vibración

Fuente: propia

Imágen 23. ADXL337

Fuente: <https://www.sparkfun.com/products/12786>

Imágen 24. ADS1115

Fuente: <https://electronilab.co/tienda/ads1115-conversor-analogico-digital-adc/>

Imágen 25. Esquema prototipo

Fuente: propia

Imágen 26. Prototipo

Fuente: propia

Imágen 27. Cajetín

Fuente: propia

Imágen 28. Planificación colocación de sistema para los ensayos

Fuente: propia

Imágen 29. Ensayos en la parte central del tablero

Fuente: propia

Imágen 30. Detalle prototipo durante ensayos

Fuente: propia

Imágen 31. Registro aceleraciones punto 2 de medición

Fuente: propia

Imágen 32. DFT punto 2 de medición

Fuente: propia

Imágen 33. DFT de los tres puntos de medición de la campaña

Fuente: propia

Imágen 34. Análisis modal por FEM: frecuencias fundamentales

Fuente: propia

Imágen 35. DFT datos Smartphone

Fuente: propia

Imágen 36. Frecuencias fundamentales del modelo actualizado

Fuente: propia